



Diseño de un sistema de gestión de inventarios para una compañía comercializadora de repuestos del sector automotriz

Fernando Gómez Hernández
Correo: edwingohe@unisabana.edu.co

Proyecto de grado para optar al título de Maestría en Gerencia de Producción y Operaciones

Asesor: MSc. Carlos Rodrigo Ruiz Cruz

UNIVERSIDAD DE LA SABANA
CHIA, CUNDINAMARCA
Marzo, 2022

Nota de aceptación

Jurado 1

Jurado 2

Fecha: _____

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi gratitud a Dios, por ser mi guía durante cada momento de mi vida.

A mi familia Elvira, Paula y Samuel, quienes, con su amor incondicional, esfuerzo y ejemplo me motivan a superar cada una de mis metas.

Al director de trabajo de grado, Ing. Carlos Ruíz, que con su orientación, conocimiento y colaboración me permitió culminar con éxito este proyecto.

A la empresa y compañeros de trabajo quienes con su tiempo y conocimiento me aportaron consejos para el desarrollo de esta trabajo de grado.

Fernando Gómez Hernández

Contenido

1.	Introducción	14
2.	Antecedentes	15
2.1	Cadena de Suministro	17
2.2	Filosofía: Justo a Tiempo.....	18
2.3	Clasificación Actual del Inventario	19
2.4	Sistema de Reposición: SOQ	22
3.	Justificación	24
3.1	Clasificación del Inventario.....	25
3.2	Pronóstico de Demanda.....	25
3.3	Sistema de Abastecimiento	25
4.	Pregunta de investigación.....	26
4.1	Objetivo General	26
4.2	Objetivos Específicos	26
5.	Revisión de Literatura	27
5.1	Gestión de Inventarios	27
5.2	Modelos de Clasificación de Inventario	32
5.2.1	Clasificación ABC Multicriterio	35
5.2.2	Clasificación para Generar Pronósticos	39
5.3	Modelos de Pronósticos.....	44
5.3.1	Error de Pronósticos.....	49
5.3.2	Evaluación de Pronósticos: Datos de Entrenamiento y Prueba	51
5.4	Modelos de Reposición del Inventario	52
6	Modelo de Clasificación ABC Multicriterio	58
6.1	Definición de Variables Multicriterio	60
6.2	Proceso Analítico Jerárquico (AHP).....	61
6.3	Calificación de Criterios	64
7	Propuesta: Clasificación ABC Multicriterio.....	67
7.1	Categoría A Multicriterio.....	71
7.2	Categoría B Multicriterio.....	73
7.3	Categoría C Multicriterio.....	74
8	Propuesta: Modelo de Pronóstico por Grupo Multicriterio	76
8.1	Clasificación de Grupos de Pronóstico.....	76
8.2	Desarrollo del Modelo de Pronóstico.....	79
8.2.1	Pronósticos Categoría A Multicriterio	82

8.2.2	Pronósticos Categoría B Multicriterio	89
8.2.3	Pronósticos Categoría C Multicriterio	90
9	Propuesta: Modelo de Revisión Periódica (R,S)	91
10	Conclusiones	97
11	Anexos.....	101
11.1	Código de Programación Pronóstico: R-Studio.....	101
12	Referencias Bibliográficas	104

Lista de Figuras, Gráficas, Ecuaciones, Tablas e Ilustraciones

Lista de Gráficas

Gráfica 1 Ubicación Espacial: Proveedores. Fuente: Elaboración Propia	17
Gráfica 2 Enfoque Integrado para la Gestión de Repuestos. Fuente: Adaptado de Bacchetti et. al (2011)	28
Gráfica 3 Clasificación Pronóstico: Patrones de Demanda. Fuente: Syntetos et al (2005).....	41
Gráfica 4 Patrón de Demanda Errático. Fuente: (FrePPLe.com, s.f.)	41
Gráfica 5 Patrón de Demanda Irregular. Fuente: (FrePPLe.com, s.f.).....	42
Gráfica 6 Patrón de Demanda Estable. Fuente: (FrePPLe.com, s.f.).....	42
Gráfica 7 Patrón de Demanda Intermitente. Fuente: (FrePPLe.com, s.f.)	42
Gráfica 8 Modelo de Revisión Periódica. Fuente: (Vidal, 2010).....	53
Gráfica 9 Distribución normal y Tasa de Servicio P1. Fuente: Adaptado de (Guerra Valverde, 2014)	55
Gráfica 10 Desarrollo Clasificación Multicriterio ABC. Fuente: Elaboración Propia	58
Gráfica 11 Clasificación Multicriterio ABC: SKU Vs Ventas Acumuladas. Fuente: Elaboración Propia	68
Gráfica 12 Comparación Clasificación Actual vs Multicriterio. Fuente: Elaboración Propia	68
Gráfica 13 Composición Clasificación Multicriterio : Grupo A. Fuente: Elaboración Propia	71
Gráfica 14 Composición Clasificación Multicriterio : Grupo B. Fuente: Elaboración Propia	73
Gráfica 15 Composición Clasificación Multicriterio : Grupo C. Fuente: Elaboración Propia	74
Gráfica 16 Clasificación Pronóstico: Patrones de Demanda. Fuente: Syntetos et al (2005).....	76
Gráfica 17 Demanda Estable PN 04152-YZZA5. Fuente: Elaboración Propia	77
Gráfica 18 Demanda Errática PN 53808-60190. Fuente: Elaboración Propia	78
Gráfica 19 Grupos de Patrón de Demanda para muestra de SKU. Fuente: Elaboración Propia	78
Gráfica 20 Proyección Pronóstico: Método Holt-Winters Aditiva. Fuente: Elaboración Propia	79
Gráfica 21 Histórico Datos de Ventas: Caída por efecto COVID-19 PN 9094202049. Fuente: Elaboración Propia	81
Gráfica 22 Interpolación Datos de Ventas: (Marzo-Agosto 2021) PN 9094202049. Fuente: Elaboración Propia	81
Gráfica 23 Modelo Pronóstico ETS: PN 9094202049. Fuente: Elaboración Propia.....	86
Gráfica 24 Modelo Pronóstico Croston: PN 9094202049. Fuente: Elaboración Propia	87
Gráfica 25 Modelo Pronóstico Holt Winters: PN 9094202049. Fuente: Elaboración Propia	87
Gráfica 26 Modelo Pronóstico ARIMA: PN 9094202049. Fuente: Elaboración Propia	88
Gráfica 27 Modelo Pronóstico RN: PN 9094202049. Fuente: Elaboración Propia.....	88
Gráfica 28 Implementación para la definición de la nueva política de inventario. Fuente: Elaboración Propia	99

Lista de Diagramas

Diagrama 1 Pedidos de repuestos por parte de los concesionarios. Fuente: Empresa	18
Diagrama 2 Concepto: Vendo Uno, Compro uno. Fuente: Empresa.....	18
Diagrama 3 Marco Descriptivo para la Gestión de Repuestos. Fuente: Adaptado de Hu et al. (2018).....	29
Diagrama 4 Actividades: Marco Descriptivo para la Gestión de Repuestos. Fuente: Adaptado de Hu et al. (2018)	30
Diagrama 5 Disciplina: Marco Descriptivo para la Gestión de Repuestos. Fuente: Adaptado de Hu et al. (2018)	31
Diagrama 6 Clasificación para el Control de Inventarios. Fuente: Adaptado de Hu et al. (2018)	34
Diagrama 7 Sistema de Orden de Periodo Fijo (R,S). Fuente: Chase et al. (2006).....	53
Diagrama 8 Desarrollo del Pronóstico: Grupo A Multicriterio. Fuente: Elaboración Propia	82

Lista de Figuras

Figura 1 Red Neuronal Simple. Fuente: Adaptado de Hyndman et al. (2021).....	46
Figura 2 Red Neuronal con capas ocultas. Fuente: Adaptado de Hyndman et al. (2021).....	47
Figura 3 Evaluación de Pronósticos: Datos de Entrenamiento & Prueba. Fuente: Adaptado de Hyndman et al. (2021).....	51

Lista de Tablas

Tabla 1 Matriculas de vehículos nuevos. Fuente RUNT, Datos procesados por (ANDEMOS, 2020).....	15
Tabla 2 Las 10 empresas más vendedoras del Sector Automotriz. Fuente: Diario La República (2019).....	16
Tabla 3 Clasificación ABC Actual: Modelo Unicriterio. Fuente: Empresa.....	19
Tabla 4 Cortes Clasificación ABC: Inventario Vivo. Fuente: Empresa.....	20
Tabla 5 Información Ventas PN 6581-60K080. Fuente: Empresa.....	23
Tabla 6 Cálculos SOQ PN 17801-0L040.....	23
Tabla 7 Valores Tasa de Servicio Feb/2021 por líneas según Clasificación de Inventario. Fuente: Empresa.....	24
Tabla 8 Clasificación ABC: Principio de Pareto. Fuente: Gómez et al. (2020).....	33
Tabla 9 Matriz de Criterios para la Clasificación Multicriterio. Fuente: Adaptado de Castro et al. (2011).....	36
Tabla 10 Sistemas de Pronóstico según patrón de demanda. Fuente: (Vidal, 2010).....	43
Tabla 11 Criterios Propuesta de Clasificación Multicriterio ABC. Fuente: Elaboración Propia.....	60
Tabla 12 Modelo AHP: Matriz de Comparación por Pares. Fuente: (Saaty, 1997).....	61
Tabla 13 Desarrollo Modelo AHP: Matriz de Juicios. Fuente: Elaboración Propia.....	62
Tabla 14 Desarrollo Modelo AHP: Resultado Matriz de Juicio. Fuente: Elaboración Propia.....	62
Tabla 15 Cálculo Índices de Consistencia. Fuente: Elaboración Propia.....	63
Tabla 16 Clasificación Multicriterio ABC: Escala Numérica. Fuente: Elaboración Propia.....	64
Tabla 17 Clasificación Multicriterio ABC: Importancia Grupos de Repuestos. Fuente: Elaboración Propia.....	65
Tabla 18 Rango Clasificación MAD*. Fuente: Elaboración Propia.....	65
Tabla 19 Propuesta Clasificación Multicriterio ABC: Porcentajes. Fuente: Elaboración Propia.....	67
Tabla 20 Grupos Clasificación Multicriterio ABC *COP. Fuente: Elaboración Propia.....	67
Tabla 21 Grupos Clasificación Multicriterio ABC: BO. Fuente: Elaboración Propia.....	69
Tabla 22 Tasa de servicio P2 para la Clasificación Multicriterio. Fuente: Elaboración Propia.....	69
Tabla 23 Datos Clasificación Multicriterio ABC: Grupo A. Fuente: Elaboración Propia.....	71
Tabla 24 Clasificación Actual Vs Multicriterio: Grupo A. Fuente: Elaboración Propia.....	71
Tabla 25 Clasificación Multicriterio A: Grupo de Repuestos. Fuente: Elaboración Propia.....	72
Tabla 26 Datos Clasificación Multicriterio ABC: Grupo B. Fuente: Elaboración Propia.....	73
Tabla 27 Clasificación Actual Vs Multicriterio: Grupo B. Fuente: Elaboración Propia.....	73
Tabla 28 Clasificación Multicriterio B : Grupo de Repuestos. Fuente: Elaboración Propia.....	73
Tabla 29 Datos Clasificación Multicriterio ABC: Grupo C. Fuente: Elaboración Propia.....	74
Tabla 30 Clasificación Actual Vs Multicriterio : Grupo C. Fuente: Elaboración Propia.....	74
Tabla 31 Clasificación Multicriterio C: Grupo de Repuestos. Fuente: Elaboración Propia.....	75
Tabla 32 Datos Históricos Ventas PN 04152-YZZA5 *Cifras en Unidades. Fuente: Elaboración Propia.....	77
Tabla 33 Histórico Datos Ventas PN 53808-60190. Fuente: Elaboración Propia.....	78
Tabla 34 Muestras SKU para Desarrollo de Pronóstico. Fuente: Elaboración Propia.....	82
Tabla 35 Resultados Métodos de Pronóstico: Grupo Multicriterio A Errático. Fuente: Elaboración Propia.....	83
Tabla 36 Resultados Métodos de Pronóstico: Grupo Multicriterio A Estable. Fuente: Elaboración Propia.....	83
Tabla 37 Resultados Métodos de Pronóstico: Grupo Multicriterio A Irregular. Fuente: Elaboración Propia.....	83
Tabla 38 Consolidado Resultados Menores Errores MAE: Grupo Multicriterio A. Fuente: Elaboración Propia.....	84
Tabla 39 Consolidado Resultados Mayores Errores MAE: Grupo Multicriterio A. Fuente: Elaboración Propia.....	84
Tabla 40 Resultados Generales Pronóstico PN 9094202049. Fuente: Elaboración Propia.....	85
Tabla 41 Resultados Pronósticos ETS: Grupo Multicriterio B. Fuente: Elaboración Propia.....	89
Tabla 42 Resultados Promedio Móvil Simple: Grupo Multicriterio C. Fuente: Elaboración Propia.....	90

Tabla 43 Tasa de Servicio Objetivo P1. Fuente: Elaboración Propia	91
Tabla 44 Parámetros para el cálculo del Modelo (R,S): PN: 178010L040. Fuente: Elaboración Propia	92
Tabla 45 Comparación Calculo MIP Actual vs Modelo (R,S). Fuente: Elaboración Propia	94
Tabla 46 Comparación MIP Actual vs Modelo (R,S). Fuente: Elaboración Propia	95

Lista de Ecuaciones

Ecuación 1 Fórmula MIP: Punto Máximo de Inventario	22
Ecuación 2 Fórmula SOQ: Cantidad Sugerida a Ordenar	22
Ecuación 3 Fórmula Tasa de Servicio por líneas	24
Ecuación 4 Cálculo Coeficiente de Variación	40
Ecuación 5 Cálculo Promedio Intervalo de Demandas (ADI)	40
Ecuación 6 Fórmula Modelo Red Neuronal	46
Ecuación 7 Pronóstico Promedio Móvil de Orden K.....	48
Ecuación 8 Error de Pronóstico para el periodo t	49
Ecuación 9 Error de Pronósticos: MAPE.....	49
Ecuación 10 Error de Pronósticos: MAE.....	50
Ecuación 11 Error de Pronósticos: MSE	50
Ecuación 12 Error de Pronósticos: RMSE	50
Ecuación 13 Nivel Máximo de Inventario	54
Ecuación 14 Inventario Efectivo.....	54
Ecuación 15 Cantidad Pedido en el periodo n.....	54
Ecuación 16 Desviación estándar para errores de Pronósticos. (Vidal, 2010).....	54
Ecuación 17 Desviaciones estándar durante el periodo R+LT.....	54
Ecuación 18 Inventario de Seguridad	55
Ecuación 19 Probabilidad de que la normal unitaria $z \sim N(0, 1)$ tome un valor mayor o igual que k.....	55
Ecuación 20 Probabilidad de que la normal unitaria $z \sim N(0, 1)$	56
Ecuación 21 Medida de Relación de Consistencia	62
Ecuación 22 Índice de Consistencia	62
Ecuación 23 Ratio de Consistencia	62
Ecuación 24 Calificación Utilidad Unitaria.....	64
Ecuación 25 Calificación Desviación Estándar.....	64
Ecuación 26 Calificación Total: Clasificación Multicriterio ABC.....	66
Ecuación 27 Fórmula CV^2 : Coeficiente de Variación	77
Ecuación 28 Fórmula ρ intervalo de demanda	77
Ecuación 29 Cálculo posición del Inventario: Modelo (R,S)	92
Ecuación 30 Cálculo desviación estándar para los tiempos R+L: Modelo (R,S)	92
Ecuación 31 Cálculo Stock de Seguridad: Modelo (R,S)	93
Ecuación 32 Cálculo MIP Punto Máximo de inventario: Modelo (R,S).....	93
Ecuación 33 Cálculo MIP Actual: PN 178010L040	93
Ecuación 34 Cálculo Cantidad sugerida: Modelo (R,S)	93
Ecuación 35 Costo Total Relevante CTR.....	96

Nomenclatura:

- SKU: (Stock Keeping Unit) Número de referencia único de un producto.
- SP (Spare Parts): Repuestos.
- MAD*: (Mean Average Demand) Demanda promedio de los últimos 6 meses. Se agrega el símbolo * para diferenciarlo del error MAD (Desviación Media Absoluta).
- DAD: (Daily Average Demand) Demanda diaria promedio.
- SOQ: (Suggested Order Quantity) Modelo de Formulación para calcular la cantidad de pedido sugerida.
- Q_n : Cantidad a ordenar en el periodo n.
- R: Periodo de revisión del pedido.
- s : Punto de reorden.
- S ó MIP: (Maximum Inventory Position) Punto Máximo de Inventario.
- BO: (Backorder) Líneas pendientes por atender debido a la falta de inventario.
- OC: (Order Cycle) Ciclo de Pedido. Relación entre el número de pedidos de reposición realizados en un periodo de tiempo.
- OO: (On Order) Unidades ordenadas a fabrica.
- OH: (On Hand) Referencias con saldo a la mano.
- SS: (Stock Security) Stock de seguridad. Nivel extra de inventario para evitar rupturas debido a fluctuaciones de demanda o lead time.
- L ó LT: (Lead Time) Tiempo en días o meses que transcurre desde que se realiza el pedido hasta que el repuesto está disponible en el inventario.
- D_d : Demanda pronosticada sobre un intervalo de tiempo $R+L$.
- P: Posición del Inventario $OH + OO - BO$.
- UN: Unidades.
- Z: Número de desviaciones estándar respecto a la media.
- k: Factor de seguridad de inventario.
- $G_z(k)$: Función especial de la distribución normal unitaria $N(0, 1)$.
- $p_z(k)$: Probabilidad de que la normal unitaria $z \sim N(0, 1)$ tome un valor mayor o igual que k.
- CTR: Costo Total Relevante.
- CV^2 : Coeficiente de Variación.

- AHP: Proceso Analítico Jerárquico.
- ρ : Intervalo promedio entre demandas “ADI”.
- A_n : Representa cada uno criterios a valorar dentro de la matriz de comparación de pares (metodología AHP).
- λ : Vector principal de la matriz de comparación por pares.
- CR: Relación de Consistencias.
- CI: Índice de Consistencia.
- RI: Índice Aleatorio.
- CI_i : Calificación según Importancia del ítem i.
- CD_i : Calificación según Variabilidad del ítem i.
- CU_i : Calificación según Utilidad Unitaria del ítem i.
- CM_i : Calificación para el MAD*.
- CT_i : Calificación total del ítem i.
- D_i : Desviación estándar muestral del ítem i.
- PIB: Producto Interno Bruto.
- MCABC: Clasificación ABC Multicriterio.
- MILP: Programa Lineal de Enteros Mixtos.
- RN: Redes Neuronales.
- NNAR: Serie Temporal de Redes Neuronales.
- ETS: Suavizado Exponencial.
- JIT: Filosofía Justo a Tiempo.
- ARIMA: Modelo autorregresivo Integrado de Media Móvil.
- MAPE: Error Porcentual Medio Absoluto.
- MAE: Error Absoluto Medio.
- MSE: Error Cuadrático Medio.
- RMSE: Error Cuadrático Medio de la Raíz.
- MPE: Error Porcentual Medio.
- CIUU: Clasificación Industrial Internacional Uniforme de todas las actividades económicas.
- OR: (Operation Research) Investigación de Operaciones.

- VED: (Vital, Essential & Desirable) Modelo de Clasificación de Inventario según la importancia de las referencias vitales, esenciales y deseables.
- FSN: (Fast, Slow & Non-Moving) Modelo de Clasificación de Inventario según la velocidad de movimiento de la demanda: rápida, lenta y sin movimiento.
- z_j : Valor de salida del Pronóstico utilizando el Modelo de Red Neuronal.
- b_j : Parámetro bias del Pronóstico utilizando el Modelo de Red Neuronal.
- w_i : Peso Capa Red Neuronal.
- x_i : Vector Entrada Red Neuronal.

RESUMEN

El siguiente estudio está enfocado al desarrollo de un diseño de modelo de gestión de inventarios para una compañía comercializadora de repuestos del sector automotriz, la cual busca mejorar la disponibilidad de partes. La investigación se basó en la revisión de literatura de modelos de clasificación, gestión de inventarios y sistemas de ordenamiento que han sido estudiados frente a la misma necesidad. Se aclara, que por el alto número de ítems del inventario (26,000 productos), se tomaron unas muestras para revisar la factibilidad y metodologías a desarrollar en una posible implementación a escala real.

Con respecto a la clasificación de inventarios, se plantearon dos tipos: clasificación para control del inventario y clasificación para generar pronósticos. En la clasificación para el control del inventario se propuso un modelo multicriterio basado en el Principio de Pareto y el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP). Como resultado de la Clasificación Multicriterio ABC, se identificaron los ítems relevantes, asociados al grupo A multicriterio (3,431 productos) en que la compañía debe enfocar sus esfuerzos para aumentar las ventas. Además, para el grupo A multicriterio se encontraron, las mayores líneas y unidades pendientes de despacho por falta de disponibilidad (43.1% en líneas y 66% en unidades), lo que indica la necesidad de enfocar acciones para este grupo principal de inventario. Se estima que, por la falta de disponibilidad de este grupo, la empresa dejó de facturar en el mismo periodo, un 4% mensual de las ventas totales.

Para la clasificación para generar pronósticos, se segmentó el inventario entre los 4 patrones de demanda (Estable, Intermitente, Irregular y Errática). Mediante el programa R-Studio y el paquete forecast, se probaron diferentes modelos de series de tiempo: Croston, Holt-Winters, ETS, ARIMA y Redes Neuronales. Por medio del error absoluto medio (MAE), se definió qué modelo tenía los menores errores para cada grupo. Para el grupo "A" se definió el método de Redes Neuronales, para el "B", el modelo ETS y para el grupo "C", Promedio Móvil Simple. Se destaca que los resultados de los pronósticos y errores sirvieron para el desarrollo del modelo (R,S) propuesto. En el sistema de reposición de inventario, se revisó el modelo de revisión periódica fija (R,S), obteniendo valores inferiores en 42% promedio para los puntos máximos de inventario de los ítems analizados; lo anterior conllevaría en una disminución en el valor total del inventario de la compañía.

Palabras Claves: Gestión de inventarios, Repuestos, Clasificación Inventario Multicriterio, Modelo de Revisión Periódica Fija (R,S), Pronósticos, Redes Neuronales, Tasa de Servicio.

ABSTRACT

This research proposal was focused on the design of an inventory management model for a company of the automotive sector that seeks to improve the availability of spare parts. This study was based on the literature review of classification models, inventory management, supply systems, which have been studied for the same need. It is clarified that due to the high number of items in the inventory (26,000 products), samples of items were taken to review the feasibility and methodologies to be developed in a possible full-scale implementation.

For the inventory classification, two types were generated: classification for inventory control and classification for generating forecasts. In the classification for inventory management, a multicriteria model, based on the Pareto Principle and the Hierarchical Analysis Process (AHP) was proposed. As a result of the ABC Multicriteria Classification, the relevant items, in which the company should focus its efforts to increase sales, were identified. The new classification, shows that the multicriteria group A, had the largest lines and units pending dispatch due to the lack of availability of spare parts (43.1% in lines and 66% in units); this indicates the need to focus actions for this main inventory group. It is estimated that, due to the lack of availability of this category, the company stopped billing in the same period, 4% per month of total sales.

The second classification apply for forecasting, where the parts of the inventory were classified in one of the 4 demand patterns (Smooth , Intermittent, Lumpy and Erratic). Subsequently, for each group, different time series models were evaluated using R-Studio program and the forecast package: Croston, Simple Moving Average, Holt-Winters, ETS, ARIMA and Neural Networks. With the Average Absolute Error (MAE), it was defined the best the technique for each of the groups. For the group "A" the Neural Networks method was used, for "B", the ETS and for group "C", Simple Moving Average. The forecast results, including the errors, were implemented in the periodic model (R,S) to calculate the units to order in the supply system. By using the periodic model (R,S) it was obtain lower values for the maximum points of inventory, on about 42% average of the items analyzed; this would lead to a decrease in the value of the inventory of the company.

Key Words: Inventory Management, Spare Parts, Multicriteria Inventory Classification, Period Review System (R,S), Forecast, Neural Networks, Service Rate.

1. Introducción

Problema de investigación

En la cadena de suministro, se encuentran actividades esenciales para que un producto sea comercializado hasta el cliente final. Una de esas actividades es la administración del inventario, que implica, entre otros aspectos, la definición de políticas para clasificar el inventario y los parámetros del sistema de ordenamiento. Diariamente las organizaciones enfrentan retos importantes en torno a la disponibilidad de partes, costos del inventario, variabilidad de la demanda y tiempos de suministro que generan interés por el estudio de estos conceptos.

La administración debe establecer políticas, soportadas en el uso de herramientas de simulación, optimización, pronósticos y desarrollos de clasificaciones de inventario, que permitan cumplir con los objetivos generales de la gestión de inventarios: maximizar la disponibilidad de partes a un costo mínimo. La empresa, objeto de este estudio, por problemas de disponibilidad ha incumplido con los objetivos de la tasa de servicio, por lo anterior, se propone mediante la revisión de literatura desarrollar modelos que han sido estudiados e implementados frente a la misma necesidad.

2. Antecedentes

La representación de la marca lleva 50 años en el mercado colombiano y según su clasificación de actividades económicas (CIUU: 5411 y 4530), se dedica al comercio de vehículos, autopartes y accesorios. El sector automotriz tiene importancia para la economía nacional, a continuación, relacionaremos algunos datos importantes sobre esta actividad:

En el 2019, el producto interno bruto (PIB) de Colombia tuvo un crecimiento del 3.3%, el más alto desde el año 2014. Una de las actividades económicas que más contribuyó a esa dinámica fue el comercio al por mayor y al por menor con una participación del 0.9%; en esta actividad se incluye la venta de partes para la reparación y mantenimiento de vehículos. Durante el 2019, el comercio al por mayor y al por menor tuvo una participación del 4.9% (DANE, 2020).

Con respecto a las cifras de matrículas de vehículos nuevos (Tabla 1), el RUNT (Registro Único Nacional de Tránsito), indica que entre el año 2018 y 2019 se presentó un incremento del 2.7%, esto pese a la desaceleración económica del país.

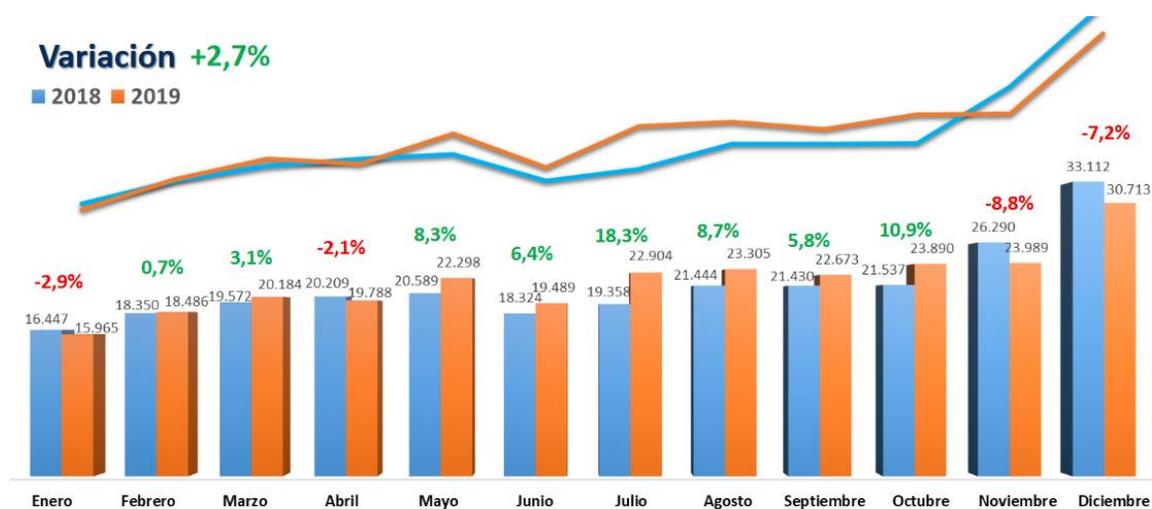


Tabla 1 Matrículas de vehículos nuevos. Fuente RUNT, Datos procesados por (ANDEMOS, 2020)

En el 2018, el Diario La República, presentó un estudio sobre los ingresos operativos y utilidades del sector automotriz. El informe indica que existen alrededor de 57 empresas relacionadas con el sector automotriz, las cuales, en su mayoría, se encuentran posesionadas entre las 1,000 empresas más grandes de Colombia. El sector automotriz registró ingresos operacionales de \$28.2 billones de pesos (COP) y utilidades por \$857,298 millones de pesos (COP) (Rodríguez, 2019).

En la Tabla 2 se relaciona las marcas automotrices más representativas del sector, se observa que Renault y Chevrolet son las empresas con mayores ingresos operacionales (5.1 billones de pesos COP). Toyota ocupó la tercera posición y es la empresa con la mayor utilidad neta (\$93,592 millones COP), esto a pesar de tener menores ingresos operativos (1.5 billones de pesos COP).

LAS MÁS VENDEDORAS DEL SECTOR

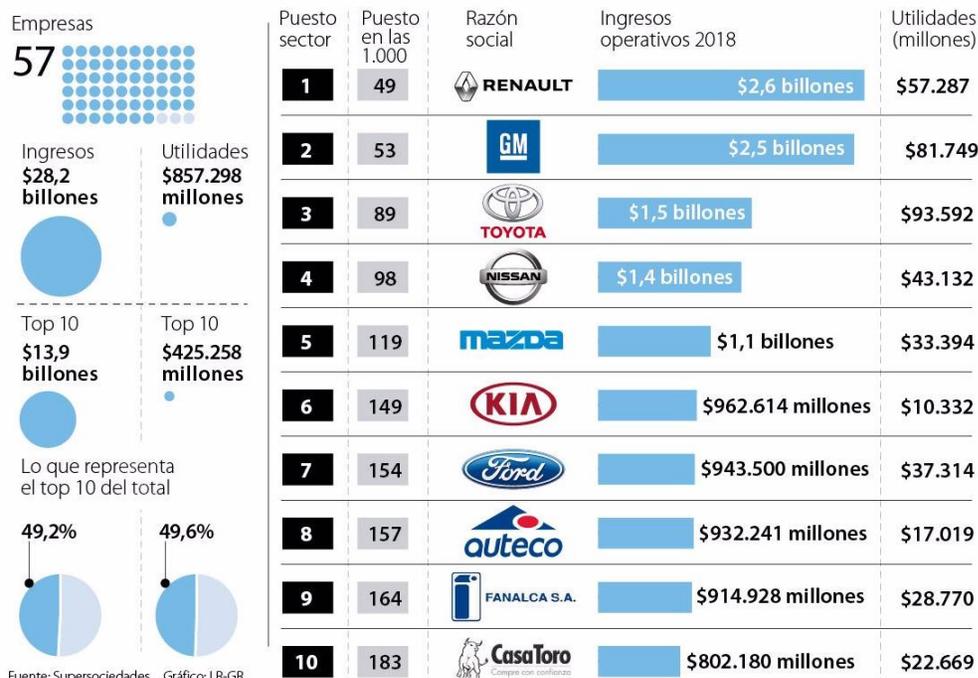
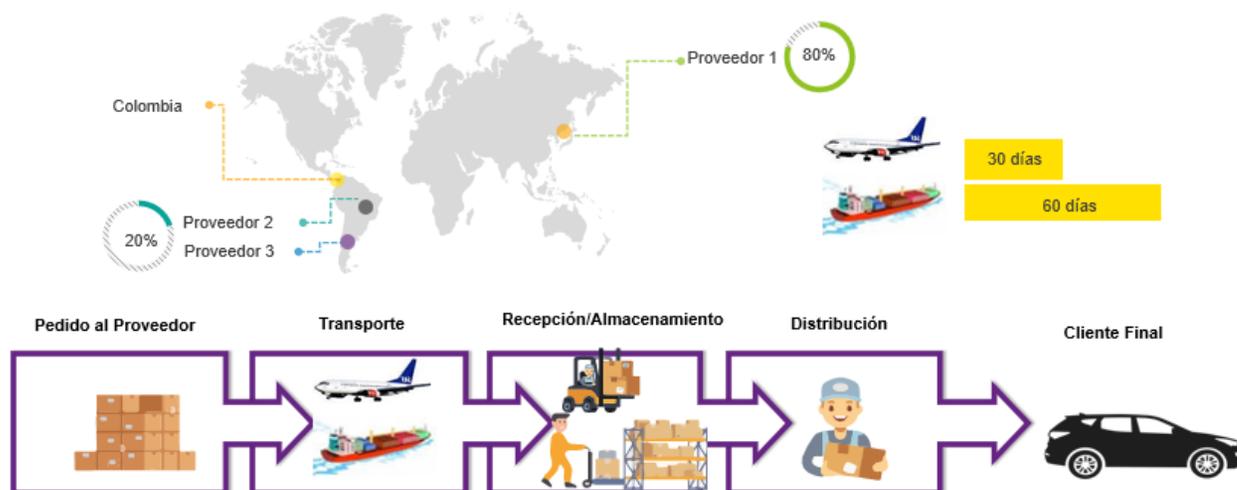


Tabla 2 Las 10 empresas más vendedoras del Sector Automotriz. Fuente: Diario La República (2019)

Luego de contextualizar el situación del sector, se explicará el modelo actual de operación de la empresa, que incluye: la cadena de suministro, clasificación del inventario y el sistema de reposición de partes.

2.1 Cadena de Suministro

Una cadena de suministro se define como el conjunto de actividades, instalaciones y medios para llevar a cabo el proceso de comercialización de un producto (Roldán, 2017). Empezaremos con la ubicación de la empresa y sus proveedores, con los cuales se importan los repuestos bajo dos modalidades: aérea y marítima. Los pedidos marítimos son utilizados para la reposición del inventario (90% del total de las ordenes), mientras que las ordenes aéreas son para atender pedidos puntuales y/o refuerzos.



Gráfica 1 Ubicación Espacial: Proveedores. Fuente: Elaboración Propia

Se define tres etapas en la cadena de suministro:

1. **Abastecimiento:** Corresponde al conjunto de actividades, tales como: análisis y clasificación del inventario, con el fin de realizar los pedidos de reposición a los diferentes proveedores.
2. **Almacenamiento:** Una vez fábrica realiza el procesamiento y facturación de las ordenes, los repuestos llegan a la bodega central de repuestos; allí se realiza el proceso de recepción, desempaque y almacenamiento de la mercancía.
3. **Distribución:** A partir de los pedidos de los concesionarios se generan los despachos de repuestos a nivel nacional. Dependiendo de la disponibilidad, la orden puede pasar a backorder o iniciar el proceso conocido de “picking”, “packing” y “delivery” (Diagrama 1).

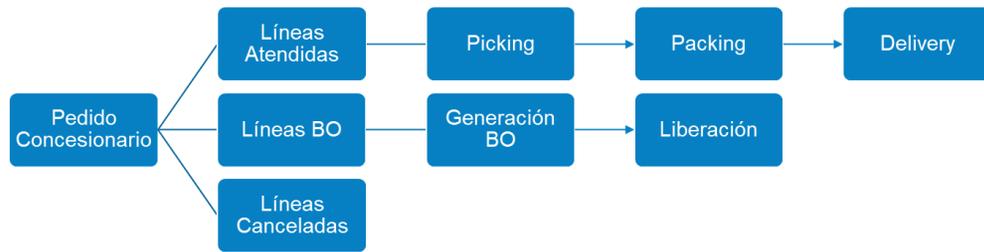


Diagrama 1 Pedidos de repuestos por parte de los concesionarios. Fuente: Empresa

2.2 Filosofía: Justo a Tiempo

La filosofía del Justo a tiempo recalca la eliminación de desperdicios mediante la reducción de excesos de capacidades o inventario, prescindiendo de actividades que no agregan valor (Krajewski, Ritzman, & Malhotra, Administración de Operaciones: Procesos y cadenas de valor, 2008). El JIT es parte del ADN de la compañía, cuya filosofía propone:

- Mantener un inventario reducido y óptimo, requiriendo que los productos lleguen a la bodega en el momento exacto, sin generar ningún contratiempo.
- No tener inventarios acumulados, sin una orden de pedido que lo haya generado. Tener un stock almacenado sin movimiento durante cierto tiempo genera: costo de oportunidad financieros, costos de almacenamiento, pérdidas y deterioros de la mercancía.
- Política “Vendo uno, Compro uno”: lo que significa que los productos deben fluir en la cadena y estar disponibles justo en el momento cuando el producto es requerido (Diagrama 2).

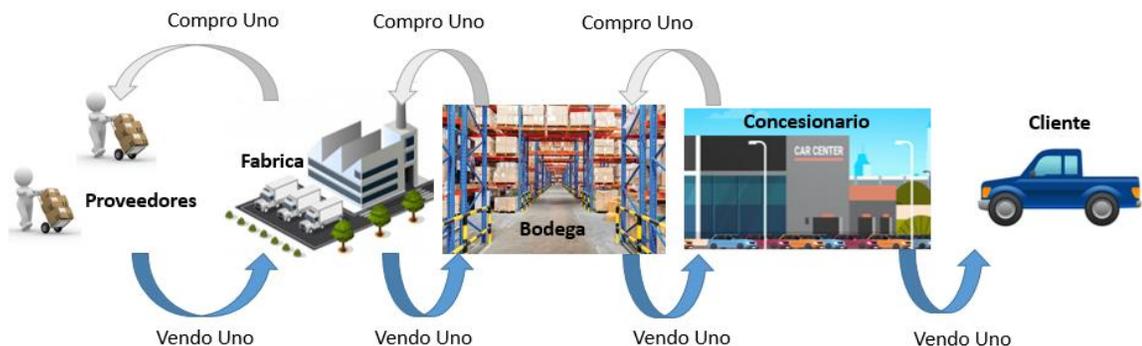


Diagrama 2 Concepto: Vendo Uno, Compro uno. Fuente: Empresa

2.3 Clasificación Actual del Inventario

Uno de los retos que tienen las empresas comercializadoras de repuestos es la gestión de un alto número de ítems, para los cuales se requiere determinar la profundidad y amplitud en el inventario. En la Ilustración 1, se observa el despiece de un vehículo, el cual podría tener entre 70,000 a 100,000 piezas; lo anterior genera un alto número de piezas que podrían ser solicitadas para atender casos de colisión o de mantenimiento. Todas esas partes del vehículo requerirían tener unas políticas de clasificación y/o reposición en el inventario.



Ilustración 1 Despiece Vehículo. Fuente: www.diariomotor.com

La base de datos tiene alrededor de 130,000 referencias, de los cuales 26,000 tienen saldo y de esas 21,000 están asociadas a repuestos. La clasificación del inventario actual está conformada por 4 grupos principales (vivo, durmiente, muerto y grupos especiales) y 12 subgrupos (A, B, C, D, E, F, G, H, I, N, Q y CS), los cuales sirven para clasificar repuestos, accesorios e ítems de boutique. El sistema de clasificación es un modelo unicriterio, donde la variable para generar la clasificación y los cortes es el MAD*(Venta promedio de 6 meses). Los cortes de los grupos se generan a partir de unos valores fijos, los cuales no tienen una justificación óptima en su definición (Tabla 3).

Inventario	Grupo	Tipo Rotación	Rotación
VIVO	A	Muy Alto	$MAD \geq 30$
	B	Alto	$5 \leq MAD < 30$
	C	Medio	$1 \leq MAD < 5$
	D	Baja	$0.33 \leq MAD < 1$
	E	Muy Baja	$0 < MAD < 0.33$
DURMIENTE	F	< 6 Meses	$MAD = 0$
	G	1 a 2 Años	$MAD = 0$
GRUPOS ESPECIALES	N	Nuevos	Creado desde 217
	CS	Campaña Servicio	Campaña Servicio
	Q	Accesorios y Boutique	Accesorios y Boutique
MUERTO	H	De 2 a 3 Años	$MAD = 0$
	I	Nulo	Sin Ventas

Tabla 3 Clasificación ABC Actual: Modelo Unicriterio. Fuente: Empresa

Se aclara que el estudio únicamente abordó muestras de ítems del inventario vivo (piezas con demanda durante los últimos 6 meses) y durmiente (movimiento menores a 2 años). Estos grupos tienen consideraciones especiales: alto número de ítems (17,000 productos), demandas creadas para clientes puntuales o de flotas, variabilidad y estacionalidad de la demanda y normatividades que exigen el suministro de partes durante un periodo no menor a 10 años (Resolución SIC: Radicación: 18- 124981 – 1).

A continuación, explicaremos las principales características de los grupos del inventario:

Inventario Vivo:

- Está compuesto por los subgrupos de repuestos A, B, C, D y E, los cuales contienen un total de 11,100 líneas; allí se encuentran clasificados ítems que por lo menos han tenido una venta en los últimos 6 meses. Este grupo genera el 84% del total de ventas y representa el 67% del costo total de inventario.
- Los grupos A, B y C tienen unos rangos de corte muy amplios, en comparación con los grupos D y E (Tabla 4). El grupo B es el que presenta el mayor rango de clasificación, agrupando ítems con MAD* entre 5 a 30 unidades ($\Delta = 25$ Unidades).

Inventario	Clasificación	Tipo	Cortes	Diferencia
VIVO	A	Muy alta	$MAD \geq 30$	NA
	B	Alta	$5 \leq MAD < 30$	25
	C	Media	$1 \leq MAD < 5$	4
	D	Lenta	$0.33 \leq MAD < 1$	0.67
	E	Muy lenta	$0 < MAD < 0.33$	0.33

Tabla 4 Cortes Clasificación ABC: Inventario Vivo. Fuente: Empresa

Inventario Durmiente:

- Está conformado por 6,116 productos que no han tenido movimiento entre los últimos 6 meses a 2 años, representando el 10% del costo total del inventario.

Inventario Muerto:

- El inventario muerto hace referencia a piezas que su última venta fue hace más de 2 años. Este grupo tiene una participación del 5.6% del costo total, lo anterior indica que el inventario sin rotación es relativamente bajo.
- Incluyen ítems que están en fase final del ciclo de vida del equipo.
- En el análisis de obsolescencia, estas partes requerirían ser evaluadas para ser aprovisionadas y posteriormente ajustadas por fuera del inventario (*scrap*).

Grupos Especiales:

Agrupación de repuestos de vehículos nuevos, campañas de servicio, accesorios y boutique. Se considera útil esta clasificación, ya que se requiere tener una clasificación especial para ítems con cierta diferenciación en la política de inventarios, existen los siguientes grupos:

- Nuevos (N): Se definen como repuestos para vehículos nuevos y que luego de su primera venta, saldría de dicho grupo e iría para la clasificación del inventario vivo.
- Campañas de Servicio (CS): Los repuestos de campaña de servicio no tienen un proceso de reposición normal, para su abastecimiento se realiza un pedido puntual en las cantidades necesarias para atender los vehículos en operación. Un ejemplo de ítems de campaña de servicio son los airbags Takata (Campaña de seguridad).
- Accesorios & Boutique (Q): Lo conforman los ítems que no vienen en la línea de ensamble del vehículo (ej.: tiros de arrastre, alarmas, cubre platonos y carpas) y que sirven para equipar los automóviles. En esta clasificación también se incluye ítems de boutique como prendas, esferos y paraguas, entre otros.

2.4 Sistema de Reposición: SOQ

La empresa tiene la política de reposición de inventario tipo Max-Max, la cual tiene como objetivo, el ordenamiento de las unidades necesarias para alcanzar siempre un punto máximo de inventario (MIP). Con respecto al tiempo de revisión de pedidos, estos tienen una frecuencia fija (diaria), basado en los siguientes conceptos:

- Reducción costos/espacios de almacenamiento: Durante el procesamiento de las ordenes diarias de fábrica (salida de mercancía), no se requeriría grandes volúmenes de mercancía, ya que únicamente se procesaría los pedidos según las demandas diarias promedio (DAD).
- Nivelación de cargas de trabajo: Cuando se realiza pedidos con una frecuencia diferente a la diaria, ejemplo semanal, las cargas de trabajo en bodega se distribuyen de manera irregular; por lo anterior, es necesario tener una operación de pedidos diarias para normalizar la carga de trabajo.

Para determinar las cantidades necesarias a solicitar, en cada análisis de pedidos, la empresa utiliza la siguiente formulación SOQ:

$$\text{MIP} = \text{MAD}^* \times [(\text{OC}) + (\text{LT}) + (\text{SS LT})]$$

Ecuación 1 Fórmula MIP: Punto Máximo de Inventario

$$\text{SOQ} = \text{MIP} - (\text{OH} + \text{OO}) + \text{BO}$$

Ecuación 2 Fórmula SOQ: Cantidad Sugerida a Ordenar

El formulación tiene en cuenta varios parámetros y variables: inventario a la mano (OH), unidades ordenadas (OO), Back Order (BO), puntos máximos de inventario (MIP) (Ecuación 1), demandas promedios (MAD*), Lead Time (LT), Ciclo de Reposición (OC) y un Stock de Seguridad por LT (SS LT). La fórmula es aplicada únicamente para los ítems que están marcados en la base de datos como sugeridos. Se recalca que todos los ítems del inventario tienen el mismo factor de seguridad indistintamente del grupo de clasificación o de la tasa de servicio objetivo.

Luego explicar la base actual del modelo de reposición, se desarrolló un ejemplo para el cálculo de la cantidad sugerida de la referencia: 17801-0L040.

Información Ventas mensuales (N=Mes Actual) :

MAD	N Actual	N-1	N-2	N-3	N-4	N-5	N-6
1,350	58	1,073	1,319	1,290	1,422	1,697	1,301

Tabla 5 Información Ventas PN 6581-60K080. Fuente: Empresa

Cálculos:

A partir de la Ecuación 1, se calcula el punto máximo de inventario (MIP), cuyo valor nos indica la cantidad máximo de inventario para cubrir el ciclo del pedido, el plazo de entrega y las existencias de seguridad. El valor del MIP es utilizado para calcular la cantidad de pedido sugerida (Ecuación 2). Para este caso el modelo nos indica a solicitar un total de 304 UN.

MIP (UN):	6,819
OO (UN):	2,920
OH (UN):	3,595
BO (UN):	-
SOQ (UN):	304

Tabla 6 Cálculos SOQ PN 17801-0L040

3. Justificación

El área de ventas tiene proyectado durante el 2021, superar las ventas promedio mensuales de \$13,000,000,000 COP, para cumplir con este objetivo es necesario mejorar la disponibilidad de partes. La tasa de servicio calculada por la empresa es uno de los aquellos indicadores, que relaciona la efectividad de la disponibilidad y se define como el porcentaje de la demanda que se logra satisfacer mediante el inventario disponible (Ecuación 3).

$$Tasa\ de\ Servicio\ (\%) = \frac{\# \text{ Líneas Atendidas}}{(\# \text{ Líneas Atendidas} + \# \text{ Líneas BO} + \# \text{ Líneas Canceladas})} \times 100$$

Ecuación 3 Fórmula Tasa de Servicio por líneas

La Tabla 7 relaciona la clasificación ABC actual, las tasas de servicio por grupo y los objetivos para el mes de Febrero/2021. Los valores obtenidos indican que se requiere entre 2-3 puntos porcentuales para alcanzar el objetivos para los grupos A, B, C y D. Se aprecia un incumpliendo de la tasa de servicio para la mayoría de las categorías de la clasificación: A, B, C, D y N. Los grupos C y D tienen la mayor participación del backorder con el 8% y 13.9% respectivamente, generando criticidad para los ítems clasificados en este rango. Al revisar otros meses del año estos tienen un comportamiento similar al del mes analizado.

Tasa de Servicio	CLASIFICACIÓN		Líneas Ordenadas	Líneas Atendidas	Líneas Backorder	Líneas Canceladas	Objetivo	Tasa de Servicio	Delta T.Servicio	BO / Total Líneas Ordenadas	Participación Líneas Ordenadas
	A	Muy Alta	10,532	10,296	246	2	99.7%	97.6%	↓ -2.1%	2.3%	39.6%
B	Alta	7,701	7,454	289	2	99.0%	96.2%	↓ -2.8%	3.8%	29.1%	
C	Media	5,110	4,725	411	25	94.3%	91.6%	↓ -2.7%	8.0%	19.4%	
D	Lenta	1,754	1,508	243	8	88.7%	85.7%	↓ -3.0%	13.9%	6.6%	
E	Muy Lenta	576	488	89	-	83.0%	84.6%	↑ 1.6%	15.5%	2.2%	
F	<6 Meses	466	187	280	1	18.0%	40.0%	↑ 22.0%	60.1%	1.8%	
N	Vehiculos Nuevos	395	356	48	1	99.5%	87.9%	↓ -11.6%	12.2%	1.5%	

Tabla 7 Valores Tasa de Servicio Feb/2021 por líneas según Clasificación de Inventario. Fuente: Empresa

Debido al alto número de 26,000 referencias del inventario, se aclara que, en esta etapa de diseño, se utilizaría muestras de ítems para desarrollar las diferentes metodologías. Por la magnitud del problema, se quiere explorar la factibilidad de implementar modelos encontrados en la revisión de literatura y que han surgido frente a la misma necesidad.

3.1 Clasificación del Inventario

El objetivo general de una clasificación de inventario es de segmentar los diferentes productos y así establecer políticas que permitan la administración de los grupos. Si la clasificación no es lo suficientemente robusta en su parametrización, se podrían tener ítems con políticas inadecuadas y/o un enfoque no prioritario para ciertas piezas. A continuación, se indicará algunas características del modelo actual:

- Modelo de clasificación unicriterio
- Los cortes de clasificación de los grupos no cuentan con una justificación óptima.
- La clasificación no considera criterios relevantes en la administración de inventarios, tales como: importancia, frecuencias, lead time, costos, utilidad, variabilidad, entre otros.
- El sistema cuenta con un alto número de grupos: 7 grupos de clasificación, donde por ejemplo el grupo A, reúne pocos ítems (195 productos) que no generan un volumen de ventas importantes.

3.2 Pronóstico de Demanda

La empresa no cuenta con modelos de previsión de la demanda, por lo que se propone aplicar diferentes técnicas de pronósticos para unas muestras de referencias. El pronóstico es una herramienta poco utilizada, pero útil para realizar una planificación de los pedidos y/o revisar alternativas en el uso de su información para estimar la demanda.

3.3 Sistema de Abastecimiento

En el tema de abastecimiento, la empresa utiliza su propia formulación para determinar la cantidad sugerida a ordenar. Esta fórmula tiene en cuenta los puntos máximos de inventarios, basados en un factor de seguridad, que es igual para todos los ítems, indistintamente de su clasificación. En la propuesta se sugiere revisar otros modelos de reposición y realizar comparaciones frente al modelo actual.

4. Pregunta de investigación

¿Cómo desarrollar un modelo de gestión de inventarios que mejore la disponibilidad de partes, teniendo en cuenta el análisis de la clasificación del inventario y el sistema de abastecimiento?

4.1 Objetivo General

Diseñar un modelo de gestión de inventarios para una empresa comercializadora de repuestos, mediante el análisis del inventario y del sistema de abastecimiento para mejorar la tasa de servicio.

4.2 Objetivos Específicos

- Proponer un nuevo modelo de clasificación de inventarios mediante el desarrollo de un análisis multicriterio y de esta forma compararlo con la clasificación actual.
- Diseñar un modelo de pronóstico de demandas basados en los históricos de la empresa y probar su desempeño con una muestra de ítems del inventario.
- Estudiar modelos de abastecimiento periódicos, considerando la tasa de servicio y evaluando su desempeño a través de la muestra de ítems seleccionados.

5. Revisión de Literatura

La revisión de literatura se enfocó en los siguientes 4 conceptos: Gestión de Inventarios, Clasificación de Inventarios, Modelos de Reposición y Pronósticos para revisar alternativas en el desarrollo de un diseño de modelo de gestión de inventarios.

5.1 Gestión de Inventarios

La gestión de inventarios consiste en mantener disponible unos bienes al momento de requerir su uso o venta, esto basado en políticas que permitan decidir cuándo y en qué cantidad reabastecer el inventario (López, 2019). Roda et al. (2014) describieron la relevancia de la gestión de inventarios, indicando que la no disponibilidad de una pieza de recambio puede provocar largos tiempos de inactividad e improductividad del equipo y consecuencias directas el lucro de la empresa; también relacionan cómo los altos inventarios inmovilizan un capital y a menudo resultan en costos relevantes.

Hu et al. (2018) abordaron el concepto de la investigación de operaciones y lo enfocaron a administración de inventarios de repuestos. Los autores definen los repuestos como artículos que se requieren para mantener un equipo en operación y que, al no estar disponible en el momento de una reparación, resultan en una pérdida financiera para la empresa; por lo anterior, la gestión de operaciones juega un papel importante para lograr la disponibilidad deseada del equipo a un costo mínimo. Jajimoggala (2012) destaca que la gestión de inventarios debe tener un enfoque sistemático y científico para reducir al mínimo el inventario y el tiempo de inactividad de las máquinas.

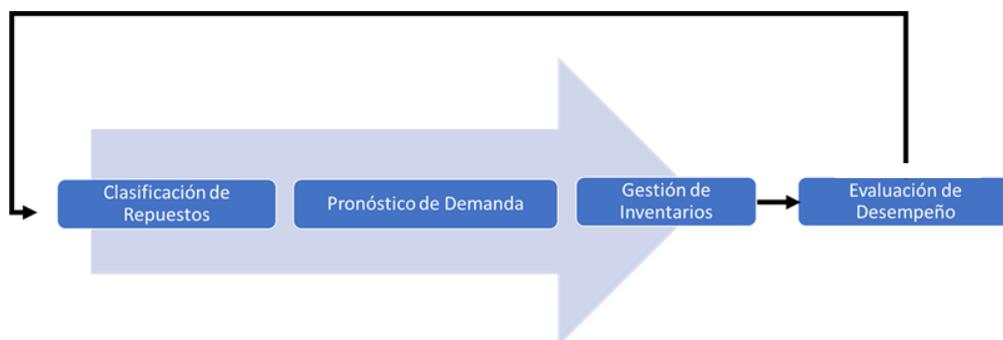
En la literatura se encuentran las siguientes características asociadas a los inventarios de repuestos: alto grado de incertidumbre sobre cuándo y la cantidad solicitada, número elevado de repuestos, el suministro de repuestos se limita con frecuencia a uno o unos pocos proveedores y finalmente cómo la obsolescencia puede ser un problema (Roda, Macchi, & Fumagalli, 2014). Silver (1981) también analizó las características y restricciones de la gestión de inventarios, tales como: existencia de patrones de demanda, grandes números de partes, modos de envío de proveedores y métodos de entrega a los clientes. Con respecto a las restricciones, se menciona: limitaciones presupuestarias, restricciones con proveedores (tamaño de lotes y máximas cantidades ordenadas), espacios de

almacenamiento y niveles de servicio deseados. Boylan et al. (2010) siguieron la misma línea e indicaron como las industrias se caracterizan por tener una amplia gama de repuestos en stock, lo que trae implicaciones significativas en torno a la disponibilidad y tenencia de inventario.

Hu et al. (2018) estudiaron las características peculiares de la gestión repuestos que generan su difícil gestión:

- Patrones de demanda intermitentes: se caracterizan por secuencias de observaciones de demanda cero intercaladas por demandas ocasionales mayores de cero que generan dificultad al momento de realizar pronósticos (Boylan & Syntetos, 2010).
- Alto número y variedad de repuestos (Guvenir & Erel, 1998).
- Obsolescencia, dónde si no se tiene una estrategia correcta, puede haber un exceso en el valor del inventario.
- Patrones de uso: Las piezas se podrían requerir para mantenimiento o ante una falla, al no tener dicho ítem, se tendría criticidad en el funcionamiento del equipo.

Frente a estas características y restricciones, varios autores han realizado propuestas de cómo abordar, de forma integral, la gestión de inventarios. Bacchetti et al. (2011) propusieron el siguiente enfoque para la gestión de repuestos, integrando la clasificación de repuestos, previsión de la demanda y la gestión del inventario, en donde debe haber una continua evaluación del desempeño de estos conceptos (Gráfica 2).



Gráfica 2 Enfoque Integrado para la Gestión de Repuestos. Fuente: Adaptado de Bacchetti et. al (2011)

Hu et al. (2018), plantearon un marco descriptivo para la gestión de inventarios de repuestos, esta propuesta fue de gran ayuda para generar una estructura en la revisión y desarrollo en este documento. Los autores indican que desde hace más de 10 años existen marcos descriptivos para la

gestión de repuestos, en comparación con las otras propuestas argumentan que su propuesta tiene un enfoque más amplio y cubre los niveles estratégicos, tácticos y operativos de las organizaciones.

El marco descriptivo de las operaciones de repuestos de Hu et al. (2018) está conformado por tres niveles (Diagrama 3):

1. Objetivos de la Gestión de Repuestos.
2. Principales tareas según la fase de vida de los equipos.
3. Disciplinas que involucran la gestión de control de repuestos.



Diagrama 3 Marco Descriptivo para la Gestión de Repuestos. Fuente: Adaptado de Hu et al. (2018)

A continuación, se explicará los 3 componentes del marco descriptivo para la gestión de repuestos:

1) Objetivos de la Gestión de Repuestos: En su techo contiene los objetivos de cualquier organización comercializadora de repuestos (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**):

1.1 Maximizar la disponibilidad de partes para el mantenimiento y reparación.

1.2 Minimizar los costos: involucrando los costos de almacenamiento, penalización por desabastecimiento y pedido.

Adicionalmente el artículo menciona, que, en esta primera capa, existen preguntas claves en la gestión de repuestos: ¿qué artículos deben ser almacenados?, ¿cuándo ordenarlos?, y ¿el número de ítems a solicitar?

2) **Principales Actividades:** Indica las principales tareas a través del proceso del ciclo de vida del equipo (Diagrama 4).

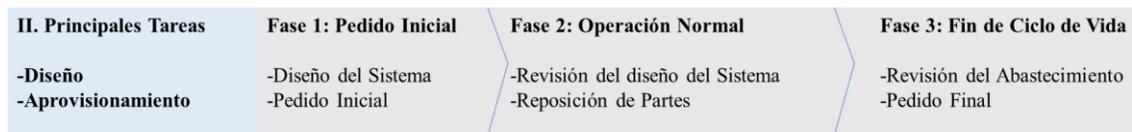


Diagrama 4 Actividades: Marco Descriptivo para la Gestión de Repuestos. Fuente: Adaptado de Hu et al. (2018)

- **Fase de adquisición inicial:** Cuando se compra un equipo, se diseña un sistema de inventario y pronóstico, adicionalmente se realiza un aprovisionamiento inicial de los repuestos.
- **Fase de funcionamiento normal:** Al entrar el equipo en operación y para satisfacer las necesidades de mantenimiento y corrección de fallas, se requiere un reaprovisionamiento de las partes. Por lo anterior, el sistema de inventario y los parámetros de pronósticos deben optimizarse para cumplir con estos requerimientos.
- **Fase de fin de Ciclo de Vida:** Debe existir una última orden de acuerdo a la demanda final del ciclo de vida del repuesto “*last time buy*”. Se resalta la importancia del uso metodologías para clasificar y pronosticar la demanda, teniendo en cuenta que no se pueden realizar más pedidos.

3) **Disciplinas:** Relaciona cuatro disciplinas para soportar y facilitar la gestión de repuestos (Diagrama 5):

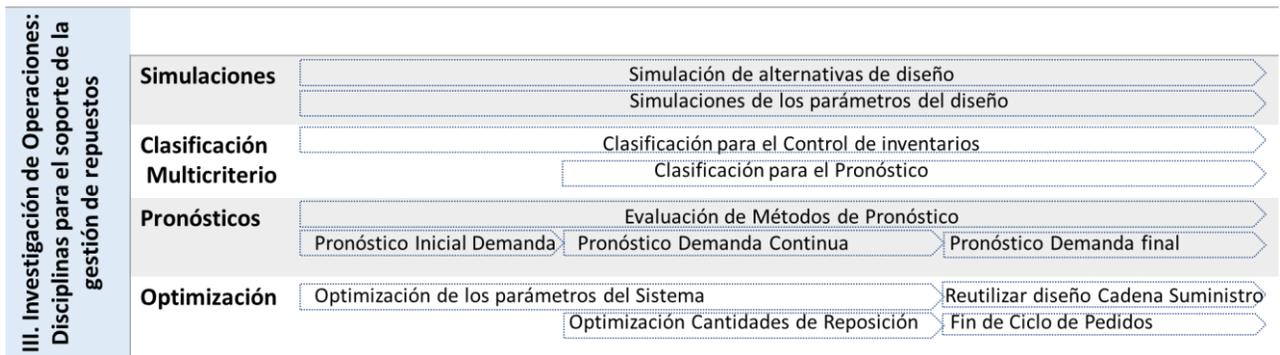


Diagrama 5 Disciplina: Marco Descriptivo para la Gestión de Repuestos. Fuente: Adaptado de Hu et al. (2018)

- **Simulaciones:** Se indica la importancia de revisar mediante una “imitación simplificada” las diferentes operaciones del sistema, con el fin de comprender y realizar mejoras. Algunas de las simulaciones que se podrían validar son:
 - Evaluación de diseños alternativos en el sistema de suministro de repuestos.
 - Simulación de los parámetros del sistema en la toma de decisiones sobre el abastecimiento de repuestos.
- **Clasificación Multicriterio:** La clasificación del inventario es una parte esencial de la gestión de repuestos, existen dos tipos de clasificaciones:
 - Clasificación para control del inventario: Es utilizada para clasificar repuestos en diferentes grupos, donde cada uno tiene definido una política.
 - Clasificación para pronósticos: Esta clasificación se usa para seleccionar un método de pronóstico apropiado para los diferentes grupos, lo anterior teniendo en cuenta las fases de operación del equipo.
- **Pronóstico :** El pronóstico de la demanda es una actividad operativa importante, y considera un desafío en la gestión de repuestos.
- **Optimización:** El texto propone la realización de un proceso de optimización, con el fin de tener una alta disponibilidad, con una inversión mínima. En este caso, se indica técnicas de optimización de inventario, con el objetivo de equilibrar la inversión, limitaciones y objetivos de la tasa de servicio.

5.2 Modelos de Clasificación de Inventario

En la literatura se encuentra variedad de modelos ya sean cualitativos o cuantitativos, para clasificar el inventario (Ferreira, Maganha, Magalhaes, & Almeida, 2018). Cuando se habla de clasificación de inventario surgen dos preguntas claves: ¿cuántas clases utilizar? y ¿cómo se determinan los límites entre las clases? (Kampen, Akkerman, & Van Donk, 2012).

Algunos modelos para abordar la clasificación del inventario son: FSN, VED y ABC. FSN se refiere a la división del stock entre las partes de movimiento rápido, lento e inmóvil. VED es una clasificación en función de la importancia de los elementos, basado en ítems vitales, esenciales y deseable (Parekh, Lee, & Kozman, 2008). Con respecto al modelo VED, Roda et al. (2014) manifiestan que, si bien es muy utilizado, esta clasificación refleja la importancia que le otorga la persona que gestiona los repuestos, por lo que existe un alto riesgo de subjetividad.

El tercer modelo es la clasificación ABC, que, a partir del valor o el volumen de la demanda, clasifica los productos en tres grupos: clase A, clase B y clase C (Kampen, Akkerman, & Van Donk, 2012). Ford Dickie, ingeniero de la empresa General Electric Company, fue uno de los primeros autores en proponer dicho modelo de clasificación ABC unicriterio. Dickie utilizó el principio de Pareto y lo aplicó al concepto de la gestión de inventarios.

Es importante resaltar el texto de Wild (2017), quien, en su libro, relaciona como una buena alternativa el análisis de Pareto en la gestión de inventarios, el autor menciona lo siguiente: “El análisis de Pareto es la técnica que forma la base del inventario y es un principio importante de gestión, que puede ser aplicado para minimizar el esfuerzo y obtener los mejores resultados”. Wild (2017) destaca que el mayor esfuerzo debe dirigirse a la gestión de los elementos que son más importantes para alcanzar los objetivos de la organización. Adicionalmente manifestó que los mejores resultados se obtienen organizando los esfuerzos correctamente, ya que no existe tiempo suficiente para mantener un control detallado de todos los elementos individuales del inventario. Si el nivel servicio es el objetivo, la atención a algunas líneas de rápido movimiento a menudo proporciona la mayor parte de la mejora requerida.

Otros autores resaltan la importancia de concentrarse en los elementos de la “categoría A” para maximizar la eficacia de la gestión (Flores & Whybark, 1985). Gómez et al. (2020) indicaron, que dado el valor económico del grupo A, éste es relevante para el aprovisionamiento.

En la clasificación de inventarios, la categoría A agrupa los productos que tienen un consumo elevado, el B, ítems con un valor de consumo medio y por último C, artículos con el menor movimiento o consumo (Collignon & Vermorel, 2012). Otros autores definen la clasificación como: A, muy importante, B, moderadamente importante y C, relativamente poco importante (Ching-Wu, Gin-Shuh, & Chien-Tseng, 2008). Flores et al. (1985) describieron las tres categorías de la siguiente manera: A, un pequeño número de artículos que representan una gran parte del costo-volumen, B, una categoría intermedia de artículos de costo moderado y C, un gran número de artículos de bajo costo y/o uso.

Para los cortes de clasificación entre AB y BC, existen rangos no tan estrictos, Gómez et al. (2020) propusieron los siguientes rangos, según el porcentaje de números de partes y ventas.

Clasificación	% del Número de Partes	% Ventas
A	10%-20%	70%-80%
B	30%-40%	15%-20%
C	40%-50%	5% - 10%

Tabla 8 Clasificación ABC: Principio de Pareto. Fuente: Gómez et al. (2020)

Con respecto a la clasificación multicriterio, los primeros en abordar dicha metodología son Flores & Whybark (1987), quienes relacionan criterios de clasificación diferentes a la de costo-demanda anual. Los autores indican que no existe un número apropiado de categorías o variables para realizar la clasificación, este número debe ser definido por la administración. Frente a la comparación entre la clasificación de criterio único y la multicriterio, Cohen et al. (1998) indicaron, que la clasificación unicriterio, no tiene en cuenta variables importantes desde el punto de vista “administrativo, producción, distribución y abastecimiento”. Chawla et al. (2019) comentaron que muchas dimensiones de la gestión de repuestos se ignoran cuando se utiliza una clasificación de criterio único. Hu et al. (2018) incluyeron en su marco descriptivo para la gestión de repuestos, la utilización de clasificaciones multicriterio. Por otro lado, Parekh et al. (2008) precisan que este modelo es el más común y que en su forma tradicional tiene algunas deficiencias para inventarios que no son homogéneos, como es el caso de las piezas de repuesto, por lo que es necesario incluir más criterios en su clasificación.

Hu et al. (2018) explicaron el modelo de clasificación multicriterio, mediante dos subdivisiones: agrupaciones fijas de números de grupos (clasificación ABC y VED) y grupos óptimos, obtenidos a partir de un proceso de programación lineal de enteros mixtos (MILP).



Diagrama 6 Clasificación para el Control de Inventarios. Fuente: Adaptado de Hu et al. (2018)

5.2.1 Clasificación ABC Multicriterio

En la propuesta del diseño un sistema de gestión de inventario se definió aplicar el modelo de clasificación multicriterio; en la actualidad este modelo ha atraído la atención de académicos y profesionales (Zowid, Babai, & Douissa, 2019).

5.2.1.1 Variables/Criterios para Clasificación Multicriterio

En la revisión de literatura se encontraron diferentes variables/criterios, los cuales fueron revisados para desarrollar este documento. Rada et al. (2014) mencionaron los siguientes criterios: costo de desabastecimiento, tiempo de reabastecimiento, precio unitario de los artículos, volumen de demanda, valor de uso, previsibilidad de la demanda, tasa de obsolescencia, etapa de ciclo de vida y la probabilidad de falla de los artículos. Flores et al. (1987) utilizaron en sus trabajos: demanda, obsolescencia, costo, lead time, criticidad, impacto artículo y sustituibilidad. Teunter et al. (2010) relacionaron los criterios: tasa de demanda y costos de: almacenamiento, escasez y cantidad de pedidos.

Kampen et al. (2012) propusieron los siguientes criterios agrupados en cuatro categorías: volumen (demanda y variabilidad), producto (variaciones, ciclo de vida y requisitos de almacenamiento), consumo (heterogeneidad y la correlación de comportamientos de uso) y finalmente tiempo (lead time y la frecuencia de la demanda). Ramanathan, (2004) mencionó los siguientes criterios: costo de inventario, criticidad de la pieza, tiempo de entrega, obsolescencia, sustituibilidad, número de solicitudes del artículo en un año, escasez, durabilidad, reparabilidad, tamaño del pedido, disponibilidad de existencias, distribución de la demanda y costo de penalización por desabastecimiento. Castro et al. (2011) generaron, una amplia matriz de criterios para clasificar el inventario diferenciando según el tipo de ítem (materia prima o repuesto) y sector (fabricante o comercializador) (Tabla 9).

Criterios	Unidad de Medida	Entrada		Salida	
		Materias Primas	Repuestos	Fabricante	Comercializadora
Demanda / Venta Anual	Unidades / Año			X	X
Consumo / Utilización Anual	Unidades / Año	X	X		
Inventario Promedio	Unidades / Año	X	X	X	X
Costo Unitario	\$/ Unidad				
Volumen	m3/ Unidad	X	X	X	X
Criticidad	0,1,2,3,4,5	X	X		
Costo Anual del Inventario	\$/ Año	X	X	X	
Tiempo de Entrega	Unidades de tiempo	X	X		X
Escasez	1,2,3,4,5	X	X		
Durabilidad	1,2,3,4,5	X	X		
Sutituibilidad	1,2,3,4,5		X	X	X
Reparabilidad	1,2,3,4,5		X	X	X
Número de Proveedores	Cantidad	X	X		X
Almacenabilidad	1,2,3,4,5	X	X	X	X
Tamaño de Lote	Unidades / Año	X		X	X

Tabla 9 Matriz de Criterios para la Clasificación Multicriterio. Fuente: Adaptado de Castro et al. (2011)

5.2.1.2 Metodologías para la Clasificación Multicriterio

Frente a metodologías para aplicar los modelos de clasificación multicriterio existen: Programación Matemática, Metaheurística, Inteligencia Artificial (IA), Toma de Decisiones Multicriterio o metodologías híbridas (Kaabi, Jabeur, & Ladhari, 2018). Puente et al. (2010) realizó estudios sobre la clasificación del inventario mediante lógica difusa. Bacchetti et al. (2011) relacionaron las siguientes técnicas: modelos matriciales, optimización lineal, redes neuronales, distancias euclidianas con optimización cuadrática y lógica difusa. Gajpal et al. (1994) y Stoll et al. (2015) abordaron estudios de clasificación utilizando el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP). Flores et al. (1985) analizaron diferentes enfoques y métodos analíticos, tales como: programación de objetivos, desarrollo de matrices y procedimientos heurísticos.

Jajimoggala (2012) realizó un estudio, donde comparó metodologías estudiadas por varios autores; entre ellas menciona los textos de Flores et al. (1989), quienes desarrollaron el concepto de matrices de criterio, Jajimoggala considera que esta es una metodología “relativamente difícil” de implementar cuando se deben considerar varios criterios. Duchessi et al. (2015) expusieron un modelo de clasificación bidimensional a partir del costo y criticidad de las piezas. Petrovic et al. (1992) abordaron modelos heurísticos para el control de inventarios, mediante el uso de un software

denominado “SPARTA”. Esta herramienta computacional se basa en cálculos de sugeridos y clasificación según la disponibilidad, importancia, precio, peso, volumen de la pieza, disponibilidad de repuestos en el mercado y eficiencia de reparación.

Cohen et al. (1988) propusieron una técnica denominada ORG (Operations Related Groups) que clasifican los productos en grupos basados en la política de control de inventarios. En el desarrollo de esta herramienta, se encuentran diferentes categorías de clasificación (partes eléctricas, motor, transmisión, carrocería) y atributos de los repuestos (precio al cliente, volumen, LT, aplicabilidad, criticidad, año de introducción de la pieza y demanda). Para determinar el número de grupos óptimos se debe formular un proceso de optimización que satisfaga tanto el rendimiento operativo como las restricciones estadísticas. Guvenir et al. (1998), aplicaron la técnica de algoritmo genético, mediante el desarrollo de este método de optimización y relacionándolo con el tema de inventarios, surgió GAMIC (Genetic Algorithm for Multicriteria Inventory Classification). Con el algoritmo genético se determinaron los pesos de los criterios y los puntos de corte entre AB y BC.

Casos Aplicados:

Flores et al. (1987), investigaron la aplicación de modelos multicriterio para empresas de servicio y fabricación de bienes de consumo. Uno de los casos de éxito ocurrió con una empresa de manufactura en Monterrey, México, donde a partir de una clasificación multicriterio (criterios: costo, lead time, costo de los subconjuntos) se redujo el valor del inventario y se mejoró el cumplimiento de los cronogramas de entrega.

Pacheco (2016), estudiante de la Universidad de la Sabana, realizó un diseño de gestión de inventarios de repuestos para una empresa colombiana de hidrocarburos. Por medio de la metodología AHP desarrolló una clasificación multicriterio de repuestos requeridos en la operación de mantenimiento de una planta petroquímica. Se encontraron reducciones superiores al 3% de los costos totales de la operación de una de las plantas por efecto de la clasificación multicriterio.

En otros tipos de industrias, como de materias primas, también se han desarrollados estudios sobre el empleo de clasificaciones multicriterio. Cobo Betancourt (2016), estudiante de la Universidad Javeriana, utilizó los siguientes cuatro criterios para una empresa de cosméticos: tiempo de reposición, confianza en calidad, valor y cantidad de consumo. Al comparar el impacto del nivel

óptimo del inventario calculado con el modelo propuesto vs. los niveles actuales de inventario, se encontró que los indicadores de eficiencia incrementaron.

Chawla et al. (2019), de la Universidad de MIT, desarrollaron para, la compañía Gerber Technology, empresa de comercializadora de máquinas industriales y repuestos, mejoras en el proceso de pronósticos y recomendaciones para la gestión de los repuestos. Los autores generaron dos tipos de clasificaciones: clasificación multicriterio para el control del inventario y clasificación para generar pronósticos. Por medio de esta propuesta de clasificación, se calculó un ingreso adicional de oportunidad de aproximadamente \$1.3M con el actual patrón de demanda.

Frente a la metodología de clasificación multicriterio, Chawla et al. (2019) desarrollaron una herramienta de optimización, la cual recibe las entradas de la pesos porcentuales para los 6 criterios de la clasificación (Promedio de costos, Ingresos Anuales, Lead Time, Costo de ordenar, Importancia Estratégica y Relación de Despachos); los pesos de cada criterio son ingresados por los usuarios hasta completar el 100%. Se considera que esta propuesta podría presentar errores de subjetividad frente a los datos ingresados; por lo anterior, es importante en el desarrollo del modelo propio, efectuar un análisis de consistencias para los juicios realizados de las personas de la organización que participen en la definición y ajustes de los criterios.

5.2.2 Clasificación para Generar Pronósticos

Los pronósticos son modelos matemáticos que utilizan datos históricos, para generar aproximaciones sobre un resultado y que, dependiendo del comportamiento del producto y método utilizado, pueden generar mayores o menores errores. El pronóstico de la demanda de repuestos ha recibido una atención considerable durante los últimos cincuenta años, siendo un problema desafiante para las organizaciones (Turrini, Meissner, & Pinçe, 2021). A pesar de la importancia de la predicción de la demanda para el control de inventarios, la investigación de repuestos se ha centrado principalmente en el modelado de inventarios (Hua & Zhang, 2006).

Boone et al. (2008) indicaron que los pronósticos de la demanda es un requisito básico de la gestión de repuestos. Nahmias (2007), relaciona que los pronósticos juegan un papel importante en la función de las operaciones de una compañía, resaltando que la planeación de negocios se basa en los pronósticos. Chambers et al. (1971) concluyeron que las predicciones sólidas de las demandas y las tendencias ya no son artículos de lujo, sino una necesidad, esto si los gerentes quieren hacer frente a la estacionalidad y cambios repentinos en los niveles de demanda. Hanke et al. (2010) resaltaron que la función de los pronósticos es de presentarlos a la gerencia para su aprobación y uso en el proceso de planeación.

Sanders et al. (2003) realizaron una encuesta a 240 compañías sobre el uso de modelos de pronósticos, indicando que el 48% utilizan hojas electrónicas para hacer sus pronósticos, mientras que sólo el 10.8% reportaron un software comercial de pronósticos. Vidal (2010) se basó en el estudio de Sanders et al. (2003) indicando que la causa más probable de la insatisfacción con los sistemas de pronósticos es la dificultad en comprender los resultados y la lectura de los reportes. Existen otros artículos que analizan la brecha entre la investigación y la puesta en marcha de pronósticos y modelos de clasificación de inventario (Wagner et al. 2008):

- i. Falta de conciencia, inversión de tiempo y recursos de la alta dirección en el negocio de repuestos, esto pese a su contribución y beneficios.
- ii. Poco conocimiento que las empresas tienen de su base instalada.
- iii. Escaso uso de modelos de inventarios ad hoc para partes.
- iv. Funcionalidades que brindan los sistemas ERP para apoyar las actividades de previsión y planificación.

En la revisión de la literatura se encuentra que Boylan, Syntetos, Williams y Croston, son los mayores exponentes en los pronósticos.

J.D Croston fue uno de los primeros autores en realizar publicaciones sobre pronósticos, pues en 1972 estudió cómo las demandas intermitentes terminaban por producir niveles de stock inapropiados. Croston demostró que uno de los métodos utilizados, la atenuación exponencial, generaba desvíos importantes en la perspectiva de demandas intermitentes (Croston, 1972). Williams en 1984, abordó la categorización de los productos con el fin de asignar mejores técnicas de pronóstico, propuso las siguientes tres categorías: (i) suave, (ii) esporádico, (iii) movimiento lento (Williams (1984)). Luego Syntetos (2001), planteó la categorización los repuestos en 4 grupos de pronósticos: (i) intermitente, (ii) bajo movimiento, (iii) errático y (iv) irregular.

Posteriormente Syntetos, Boylan, & Croston (2005), propusieron los siguientes cuatro grupos de clasificación de pronóstico: (i) Errático, (ii) Irregular, (iii) Suave, e (iv) Intermitente, además definieron los cortes para clasificar los patrones de demanda $\rho = 1.32$ y $CV^2 = 0.49$.

En la Gráfica 3, se relacionan los cuatro patrones de demanda y sus respectivos cortes, para los cuales se debe definir un método de pronóstico que se ajuste a cada grupo. Para los cortes de la clasificación, Syntetos se basó en los cálculo de dos valores: coeficiente de variación y el promedio del intervalo de la demanda (ρ). El coeficiente de variación CV se calcula mediante la desviación estándar de la demanda entre la demanda media (Ecuación 4).

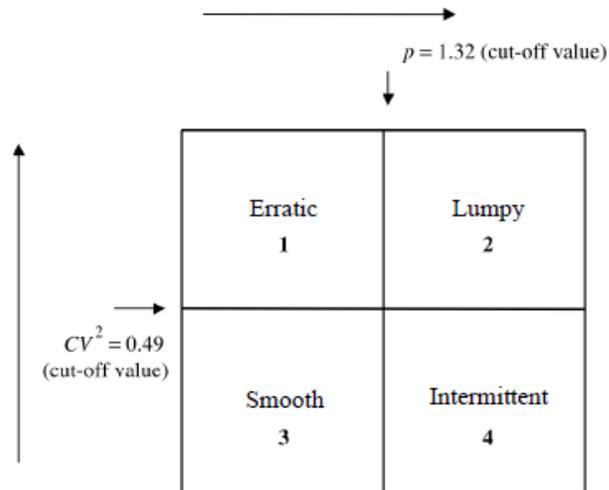
$$CV = \frac{\sigma_x}{\bar{X}}$$

Ecuación 4 Cálculo Coeficiente de Variación

El promedio del intervalo de la demanda (ρ) o ADI, es el tiempo promedio entre las señales de demanda; en otras palabras, hace referencia a cuánto tiempo tarda en promedio para que aparezca una demanda mayor a cero.

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N}$$

Ecuación 5 Cálculo Promedio Intervalo de Demandas (ADI)



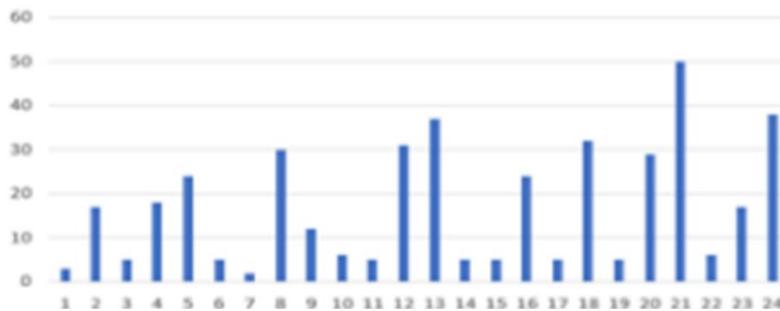
Gráfica 3 Clasificación Pronóstico: Patrones de Demanda. Fuente: Syntetos et al (2005)

A continuación, se define los 4 patrones de demanda basados en Callegaro (2009):

- **Patrón Errático:**

Cortes: $\rho < 1.32$ and $CV^2 \geq 0.49$.

El patrón errático se caracteriza por gran variabilidad en la cantidad la demanda, siendo esta aproximadamente constante en el tiempo (Callegaro, 2009) (Gráfica 4).

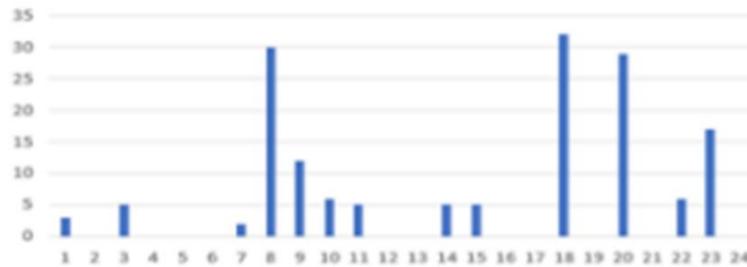


Gráfica 4 Patrón de Demanda Errático. Fuente: (FrePPLe.com, s.f.)

- **Patrón Irregular (Lumpy):**

Corte: $\rho \geq 1.32$ and $CV^2 \geq 0.49$.

La categoría irregular, es la más difícil de controlar, ya que se caracteriza por varios periodos en que la demanda es cero, acompañado de una gran variabilidad en la cantidad de demanda (Callegaro, 2009) (Gráfica 5).

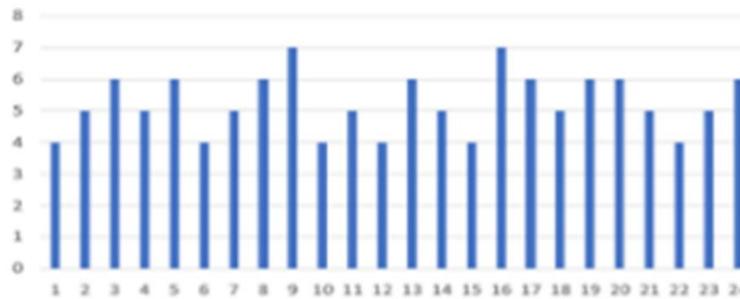


Gráfica 5 Patrón de Demanda Irregular. Fuente: (FrePPLe.com, s.f.)

- **Patrón Estable o Suave:**

Corte: $\rho < 1.32$ and $CV^2 < 0.49$.

Se caracteriza por no tener variaciones significativas sobre la media histórica (Gráfica 6).

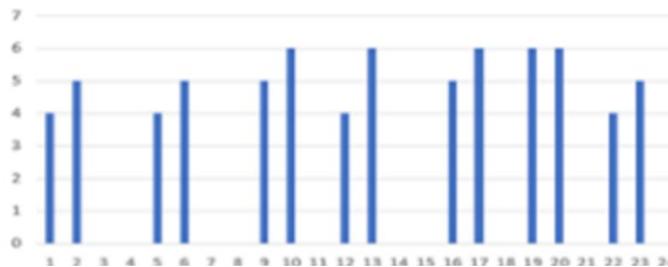


Gráfica 6 Patrón de Demanda Estable. Fuente: (FrePPLe.com, s.f.)

- **Patrón Intermitente :**

Corte: $\rho \geq 1.32$ and $CV^2 < 0.49$.

Este tipo de demanda se caracteriza por ser extremadamente esporádica, es decir varios periodos en que la demanda es cero y donde no hay una marcada variabilidad en la cantidad demandada. (Callegaro, 2009) (Gráfica 7).



Gráfica 7 Patrón de Demanda Intermitente. Fuente: (FrePPLe.com, s.f.)

Vidal (2010), propuso los siguientes métodos de pronóstico, según los patrones de demanda. Entre los modelos sugeridos está el promedio móvil, Suavización Exponencial, Winters, ARIMA y Croston.

Patrón de demanda observado	Sistema de pronóstico recomendado
Perpetua, estable o uniforme	Promedio móvil o suavización exponencial simple
Con tendencia creciente o decreciente	Regresión lineal simple o suavización exponencial doble
Estacional o periódica	Modelos periódicos de Winters
Demandas altamente correlacionadas	Métodos integrados de promedios móviles auto-regresivos (ARIMA)
Errática (Por ejemplo, en ítems clase A de bajo movimiento)	Pronóstico combinado de tiempo entre la ocurrencia de demandas consecutivas y la magnitud de las transacciones individuales (Método de Croston y relacionados)

Tabla 10 Sistemas de Pronóstico según patrón de demanda. Fuente: (Vidal, 2010)

Casos Aplicados:

Rego et al. (2014), realizaron simulaciones con el fin de diseñar un modelo de pronóstico y definir las políticas de control de inventario para una empresa de repuestos en Brasil. Para la simulación utilizaron un total de 10.032 referencias, considerando un histórico de seis años de demanda. A partir de modelos de pronósticos como: promedio móvil simple y Syntetos - Aproximación de Boylan, simularon seis modelos de la distribución de la demanda: Normal, Gamma, Distribución Binomial Negativa NBD, Poisson-Normal compuesto, Poisson-Gamma compuesto y Bootstrapping. La principal contribución de la investigación, son las recomendaciones de políticas de tasa de servicio para cada categoría de demanda (Estable, Errático, Intermitente e Irregular).

Chawla et al. (2019), basándose en la propuesta de Syntetos, Boylan, & Croston (2005) mejoraron el sistema de pronósticos para una empresa comercializadora de repuestos del sector industrial. El estudio indica que la empresa, mejoró la precisión del pronóstico, en términos RMSE, en el rango de 7% a 14%.

5.3 Modelos de Pronósticos

Una vez explicada la forma de clasificación del inventario para generar pronósticos, se revisó literatura sobre diferentes modelos y errores en los pronósticos. Hanke et al. (2010) realizaron consideraciones para seleccionar la técnica adecuada según el horizonte de tiempo (tipo de serie: estacional, cíclica, tendencia, estacionarios) o sobre los valores estimados requeridos: corto o mediano plazo. Los autores recalcan otros factores en la evaluación de pronósticos, como los costos, tiempos y herramientas computacionales, para los cuales se debe encontrar la mejor relación costos/beneficios.

Gaither et al. (2000) mencionaron algunas recomendaciones de cómo seleccionar un método de pronóstico según el costo, precisión, datos disponibles, tiempo de ejecución, naturaleza de los productos, respuesta de impulso y amortiguación del ruido.

Nahmias (2007) describió dos modelos de pronóstico: cualitativos y cuantitativos. El cualitativo, se basa en el juicio humano, algunas técnicas son: encuestas al cliente, método Delphi y juicio de opinión ejecutiva. Por otra parte, el método cuantitativo involucra el análisis de datos numéricos, en los cuales existen tres clasificaciones:

- 1) Series de tiempo: que utilizan datos históricos para predecir un fenómeno. En los métodos de serie de tiempo, existen modelos como: suavizado exponencial, Croston y Box Jenkins, entre otros.
- 2) Modelos causales: analizan variables que están vinculadas de alguna forma a lo que se está pronosticando, algunos métodos son regresión simple y red neuronal.
- 3) Clasificación intermedia denominada “hibrida”.

A continuación, se relaciona algunos de los métodos de pronósticos evaluados en este documento:

- **ETS (Algoritmo de suavizamiento exponencial):**

Esta serie de tiempo es especialmente útil para conjuntos de datos con estacionalidad La técnica realiza una descomposición de la serie de tiempo en 3 componentes: Errores (E), Tendencia (T) y Estacionalidad (S). A continuación, se presenta las variaciones para cada una de los componentes:

- Para el error (E) existen dos tipos: Aditiva (N) y Multiplicativa (M). **{N,M}**.

- Para el componente de Tendencia (T) se definen cinco tipos: Nula (N), Aditiva (A), Aditiva Suavizada (A_d), Multiplicativa (M) y Multiplicativa Suavizada (M_d). {N, A, A_d , M, M_d }.
- Para el componente de Estacionalidad (S) existen los siguientes tipos: Nula (N), Aditiva (A) y Multiplicativa (M). {N,A,M}

Costo: Bajo.

- **Holts-Winters:**

Método que lleva el nombre de sus autores C.C. Holt (1957) y P.R. Winters (1960), esta técnica es aplicable a patrones de demanda estacionales (Vidal, 2010). Holt-Winters es una extensión del método Holt que considera sólo dos exponentes suavizantes, considerando el nivel, tendencia y estacionalidad de una determinada serie de tiempo (Villaverde, 2017).

Costo: Bajo.

- **Croston:**

Es un método que desarrolló J.D Croston en 1972 para demandas intermitentes, en su propuesta encontró que las demandas intermitentes casi siempre producen niveles de stock inapropiados (Croston, 1972). Croston divide los eventos de demanda intermitente en dos partes (Vidal, 2010):

- Primero: pronostica la probabilidad de que ocurra o no una demanda en el período siguiente, de acuerdo con las observaciones anteriores.
- Segundo: pronostica el posible tamaño de la demanda, de acuerdo con las observaciones anteriores sin tener en cuenta las demandas iguales a cero.

- **ARIMA (Modelos Autorregresivos integrados de Media Móvil):**

Es una clase de modelos lineales, aplicables a demandas altamente correlacionadas (Callegaro, 2009). Para este modelo se destaca lo siguiente:

- Requiere alto números de datos.
- Tiene como ventaja la posibilidad de considerar series no estacionarias y estacionales.

El modelo ARIMA está definido por la combinación de tres modelos: Autorregresivos (AR(p)), Integrado (I(d)) y Promedios móviles (MA(q)), donde los parámetros (p, d, q) indican el orden de cada una de las componentes.

La metodología ARIMA fue impulsada por G. E. P. Box y G. M. Jenkins, por esta razón, este modelo a menudo se conoce como metodología Box-Jenkins. La metodología Box-Jenkins se basa en un enfoque iterativo para identificar el mejor orden de modelo posible (Hanke & Wichern, 2010).

Costo: Alto.

- **Redes Neuronales:**

Hanke et al. (2010) definieron las Redes Neuronales, como un método diferente a las técnicas de pronósticos convencionales. Hyndman et al. (2021) describieron las redes neuronales como un método de pronóstico que se basa en los modelos matemáticos simples del cerebro. Este método está compuesto por una red de "neuronas" que están organizadas en capas, existen capas de entradas (información) y otras de salidas (pronósticos). En la Figura 1 se aprecia una red neuronal con cuatro entradas, donde cada una de ellas tiene un coeficiente denominado w_i (pesos). Las salidas (pronósticos) se obtienen mediante una combinación lineal de las entradas y los coeficientes w_i (Ecuación 6).

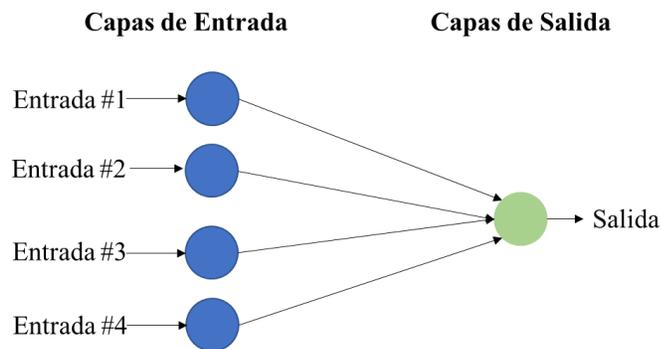


Figura 1 Red Neuronal Simple. Fuente: Adaptado de Hyndman et al. (2021)

$$z_j = b_j + \sum_{i=1}^4 w_i \cdot x_i$$

Ecuación 6 Fórmula Modelo Red Neuronal

Donde:

z_j =valor de salida
 b_j =parámetro bias
 w_i =peso
 x_i =vector entrada

Los parámetros de peso w_i y b_j se seleccionan en el marco de la red neuronal utilizando un "algoritmo de aprendizaje", el cual minimiza los errores del pronóstico (Hyndman & Athanasopoulos, 2021). En las redes neuronales también existen modelos más complejos, en donde aparecen capas ocultas, que equivalen a nuevas neuronas. En la Figura 2, se relaciona la aparición de capas ocultas que reciben entradas (información) de las capas anteriores. En este proceso la red neuronal se entrena varias veces utilizando diferentes puntos de partida aleatorios, en donde las entradas de cada uno de los nodos se ajustan mediante una combinación lineal ponderada para obtener un valor de salida.

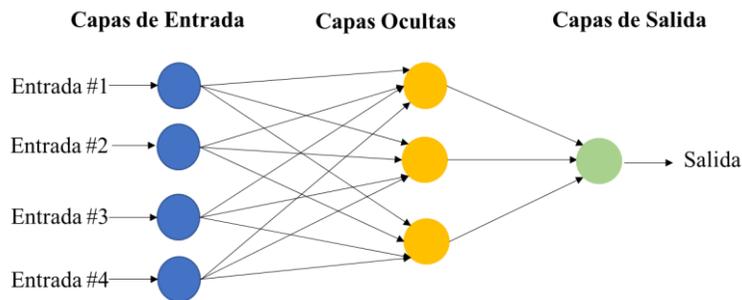


Figura 2 Red Neuronal con capas ocultas. Fuente: Adaptado de Hyndman et al. (2021)

Costo: Alto (Hanke & Wichern, 2010).

- **Promedios Móviles Simples**

El modelo de promedio móvil simple consiste en el cálculo de la media aritmética de las observaciones más recientes, obteniendo el pronóstico del siguiente período. Una vez está disponible una nueva observación, se calcula una nueva media aritmética y se descarta el valor más antiguo (Hanke & Wichern, 2010). Esta técnica de pronóstico es de los métodos más sencillos y útiles para patrones de demanda aleatorios o estable, sin tendencia o estacionalidades. Su formulación se define de la siguiente forma:

$$Y_{t+1} = \frac{Y_t + Y_{t-1} + \dots + Y_{t-k+1}}{k}$$

Ecuación 7 Pronóstico Promedio Móvil de Orden K

Donde:

Y_{t+1} = valor pronosticado para el siguiente periodo

Y_t = valor real en el periodo t

k = número de términos en el promedio móvil

Casos Aplicados

Se encuentra un caso de estudio sobre la aplicación de métodos de pronósticos para una empresa del sector automotriz en México (Cortés, 2017). Este estudio aplicó diferentes modelos pronóstico de demanda, tales como: promedios móviles, suavizado exponencial, ARIMA, Redes Neuronales artificiales (ANN) y modelos híbridos ARIMA-ANN. Cortes (2017) concluyó que los modelos de Redes Neuronales y en especial ARIMA, lograron un mejor desempeño, reduciendo el error (MAPE) de un 57% a un 32.65%; lo anterior indica que estos resultados podrían ayudar a demostrar la importancia de mejorar las metodologías de previsión para una mejor planificación industrial.

Santa Cruz et al. (2017) describieron un modelo de pronósticos para unas muestras de ítems, utilizando datos históricos de los últimos cinco años y medio. La serie de tiempo fue dividida en dos grupos: el primero con valores para estimar la previsión y el segundo, para efectos de validación y control del modelo de pronóstico. El autor indica que los errores más utilizados para la validación del modelo son los errores cuadráticos medios (RMSE) y los errores medios absolutos (MAE). El documento concluye que, en todos los casos analizados, las previsiones con redes neuronales presentaron mejores resultados que los obtenidos con los métodos clásicos (menores errores RMSE y MAE). Callegaro (2009), realizó un estudio interesante sobre el uso y análisis de diferentes métodos pronósticos para repuestos, tales como: Suavización Exponencial Simple, Croston, Aproximación Syntetos-Boylan, Winters, Poisson, ARIMA y Redes Neuronales, indicando las entradas, descripciones, modelos matemáticos, beneficios y limitantes de cada uno de los modelos evaluados.

5.3.1 Error de Pronósticos

Los errores de pronósticos se clasifican en dos tipos: sesgo y aleatorios. Los errores de sesgo son el resultado de equivocaciones sistemáticas, donde los resultados son consistentemente altos o bajos; estos errores son el resultado de ignorar o no estimar correctamente ciertos patrones de demanda, como son la tendencia y estacionalidades. Con respecto a los errores aleatorios, Krajewski et al. (2000) los definieron cómo el resultado de factores imprevisibles que influyen en la desviación de la demanda real. Los errores se pueden minimizar seleccionando modelos apropiados de pronósticos, pero en realidad es imposible suprimir los errores en todas sus formas.

Existen varias mediciones de errores de pronósticos, que, en su forma general, se calculan como la diferencia entre el valor del pronóstico para un periodo determinado y su demanda real.

$$E_t = (D_t - F_t)$$

Ecuación 8 Error de Pronóstico para el periodo t

Donde:

E_t = Error de pronóstico para un periodo t

D_t = Demanda Real para un periodo t

F_t = Pronóstico para un periodo t

n = Número de datos

A continuación, se explican algunos tipos de errores de pronósticos:

- **Error Porcentual medio absoluto (MAPE):** Es útil cuando se requiere conocer los errores en términos de porcentajes, es decir en términos de desempeño y no por medio de una cantidad. Este enfoque es útil cuando el error relativo, con respecto al tamaño del valor de la serie de tiempo, es importante (Hanke & Wichern, 2010).

$$MAPE = \frac{\left(\frac{\sum |E_t|}{D_t}\right) (100)}{n}$$

Ecuación 9 Error de Pronósticos: MAPE

- **Error Absoluto Medio (MAE):** Es un error que mide la exactitud del pronóstico, mediante el promedio de las magnitudes de los errores del pronóstico; su resultado se indica en términos de unidades (Hanke & Wichern, 2010).

$$MAE = \frac{\sum |E_t|}{n}$$

Ecuación 10 Error de Pronósticos: MAE

- **Error Cuadrático Medio (MSE):** El MSE eleva los errores de pronóstico (E_t) al cuadrado, lo anterior produce errores moderados en magnitud, lo cual es preferible frente a errores muy pequeños (Hanke & Wichern, 2010).

$$MSE = \frac{\sum E_t^2}{n}$$

Ecuación 11 Error de Pronósticos: MSE

- **Error cuadrático medio de la raíz (RMSE):** El RMS es la raíz del error MSE, sanciona los errores grandes, arrojando valores en términos de unidades de la serie. (Hanke & Wichern, 2010).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum E_t^2}{n}}$$

Ecuación 12 Error de Pronósticos: RMSE

5.3.2 Evaluación de Pronósticos: Datos de Entrenamiento y Prueba

Para evaluar la precisión del modelo de pronóstico, se divide la serie de tiempo en dos grupos: datos de entrenamiento y datos de prueba. Los datos de entrenamiento (*training data*) se utilizan para estimar los parámetros del modelo y los datos de prueba (*test data*) para evaluar su precisión (Figura 3). Los datos de prueba indican cómo es el comportamiento del modelo ante nuevos datos (Hyndman & Athanasopoulos, 2021).

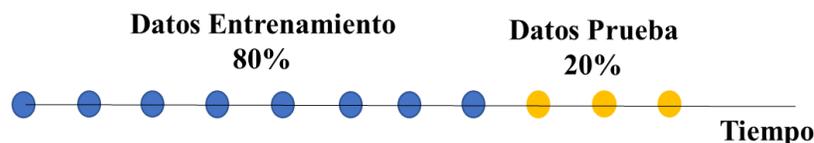


Figura 3 Evaluación de Pronósticos: Datos de Entrenamiento & Prueba. Fuente: Adaptado de Hyndman et al. (2021)

El tamaño de los datos de prueba suele ser aproximadamente el 20% de la muestra total, aunque esto podría variar, según el número de muestras. Kézdi et al. (2021) denominan los datos de prueba como “*holdout*”, indicando que los modelos de pronóstico deben construirse a partir de datos de entrenamiento, para posteriormente seleccionar el mejor modelo y realizar su evaluación usando los datos de prueba.

En la literatura se encuentran diferentes artículos, los cuales utilizan esta técnica de evaluación de pronósticos. Nakip et al. (2020) desarrollaron una propuesta para predecir los casos activos de COVID-19, con datos de entrenamiento y de prueba, utilizando modelos de Regresión Lineal (LR), Perceptrón multicapa (MLP) y Memoria a corto y largo plazo (LSTM). Liu et al. (2021) en su desarrollo de pronóstico para estimar la velocidad del viento con fines energéticos, utilizaron conjuntos de datos de entrenamiento para mejorar la capacidad de generalización de la red neuronal. La generalización se define como la relación entre el desempeño de una red entrenada con datos de entrenamiento y su desempeño con datos de prueba. Este concepto es una propiedad muy deseable para las redes neuronales, donde idealmente el rendimiento de los datos de entrenamiento debería ser similar al rendimiento con nuevos datos en la serie de tiempo (Borovykh, Oosterlee, & Bohté, 2019).

Liu et al. (2021) indican que todavía hay margen de mejoras en los métodos de predicción existentes, relacionando que estos carecen de métodos evaluación de conjuntos de entrenamiento. Además, relacionan que cuanto más información contenga el conjunto de entrenamiento, mayor será la capacidad de generalización del modelo entrenado y mejor la precisión de la predicción.

5.4 Modelos de Reposición del Inventario

En los sistemas de control inventarios existen fórmulas que determinan cuándo y cuantas unidades a ordenar en cada solicitud de pedido. Vidal (2010) menciona cuatro modelos de reposición:

- Modelo Continuo (s, Q): Cada vez que el inventario efectivo es igual o menor al punto de reorden s, se ordena una cantidad fija Q.
- Modelo Continuo (s, S): Cuando el inventario efectivo cae al punto de reorden s, se ordena una cantidad que incremente el stock hasta un nivel máximo de inventario S.
- Modelo Periódico (R, S): Este modelo propone la revisión del nivel de inventario en puntos fijos de tiempo R para determinar cuánto ordenar (Guerra Valverde, 2014). En la revisión periódica la cantidad de pedido no es fija y se ordena una cantidad igual a la diferencia entre el valor máximo de inventario S y el inventario efectivo P.
- Modelo Híbridos: Es una combinación entre los modelos (s, S) y (R, S), que consiste en que cada R unidades de tiempo, se debe revisar el inventario efectivo; si este es menor o igual al punto de reorden s, entonces se emite un pedido por una cantidad para que el inventario efectivo se recupere hasta un nivel máximo S. Si el nivel de inventario efectivo es mayor que s, no se ordena cantidad alguna hasta la próxima revisión que tendrá lugar en R unidades de tiempo (Vidal, 2010).

El modelo de revisión periódica (R,S), es el de mayor aplicabilidad, frente a las políticas de la organización: reposición del inventario tipo max-max y a la periodicidad fija en la revisión de los pedidos. Basado en lo anterior, se decidió utilizar la formulación del modelo (R,S) para desarrollar el diseño de gestión de inventarios.

En el Diagrama 7, Chase et al. (2006), describieron el modelo de revisión periódica, en donde una vez se genere una demanda, se calcula la posición del inventario para elevar nuevamente el inventario al punto requerido.

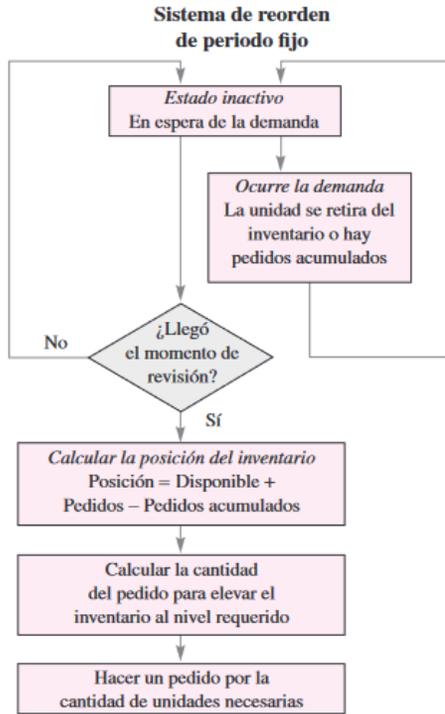
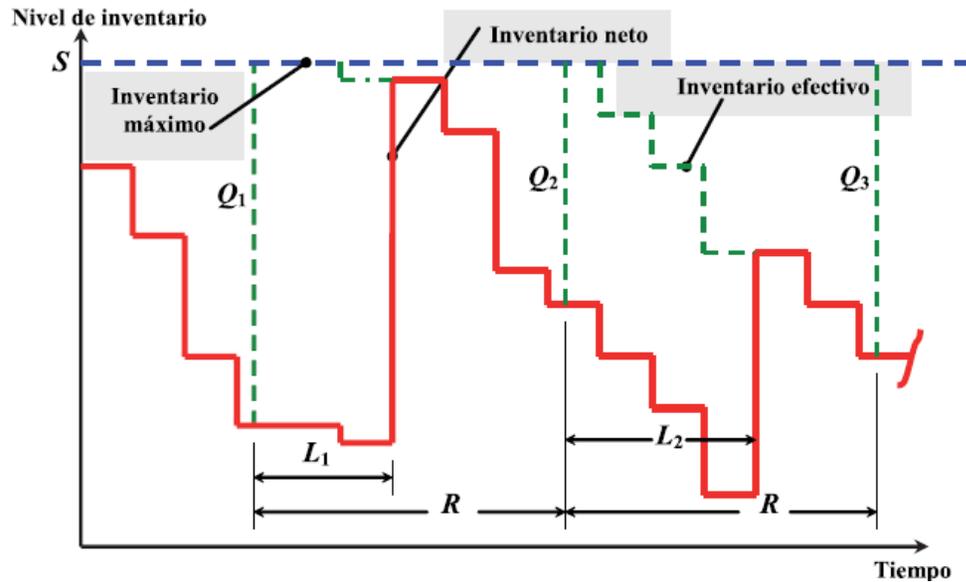


Diagrama 7 Sistema de Orden de Periodo Fijo (R,S). Fuente: Chase et al. (2006)

Vidal (2010), explicó el modelo de reposición (R,S), incluyendo la dinámica de las variables del tiempo y nivel de inventario en un proceso de ordenamiento (Gráfica 8):



Gráfica 8 Modelo de Revisión Periódica. Fuente: (Vidal, 2010)

A continuación, se explican las variables del modelo (R,S):

- **S:** Máximo punto de inventario, en la empresa se denomina como MIP.

$$S = D_d(R + L) + SS$$

Ecuación 13 Nivel Máximo de Inventario

- **R:** Intervalo de revisión del pedido, el cual es un valor fijo y determinado con anterioridad.
- **L :** Tiempo de reposición o lead time (LT).
- **D_d (R+L):** Demanda Pronosticada durante el tiempo R y L.
- **P:** Inventario Efectivo, el cual se calcula como:

$P = \text{Inventario a la mano (OH)}$

$+ \text{Pedidos pendientes por entrega de proveedores (OO)} - \text{Requisiciones pendientes a clientes (BO)}$

$$P = OH + OO - BO$$

Ecuación 14 Inventario Efectivo

- **Q_n:** Cantidad de unidades a solicitar en la revisión n.

$$Q_n = S - P$$

Ecuación 15 Cantidad Pedido en el periodo n

- **Inventario Neto:** Inventario a la mano - Requisiciones pendientes por entregar a clientes.
- **Desviación estándar: Errores de Pronóstico**

Los errores de pronóstico tienen una distribución normal sin sesgo, se calculan a partir del error MAE (Vidal, 2010).

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot MAE$$

$$\sigma_1 = 1,25 \cdot MAE$$

Ecuación 16 Desviación estándar para errores de Pronósticos. (Vidal, 2010)

- **Desviación estándar de la demanda durante los periodos R + L**

Se define otro tipo de desviación estándar de la demanda para el periodo R+L.

$$\sigma_{(R+LT)} = \sqrt{R + L} \cdot \sigma_1$$

$$\sigma_{(R+LT)} = \sqrt{R + L} \cdot 1,25 \cdot MAE$$

Ecuación 17 Desviaciones estándar durante el periodo R+LT

- **Inventario de Seguridad**

Debido a la variabilidad de la demanda y a los tiempos de reposición, es difícil garantizar que todos los pedidos sean satisfechos con el inventario a la mano. Por lo anterior, es necesario mantener un inventario de seguridad para ofrecer cierto nivel de protección contra faltantes (Vidal, 2010). Vidal indica que el arte del control de inventarios consiste en balancear un nivel de servicio adecuado al cliente a un costo mínimo total posible. Guerra (2014) indica que, al tener un mayor volumen de inventario se incurre en un menor riesgo de faltantes, pero aumenta el costo del inventario; por lo anterior, se debe buscar un equilibrio entre el nivel de servicio y el stock de seguridad. El inventario de seguridad se calcula bajo la siguiente fórmula:

$$SS = k \cdot \sigma_{(R+L)}$$

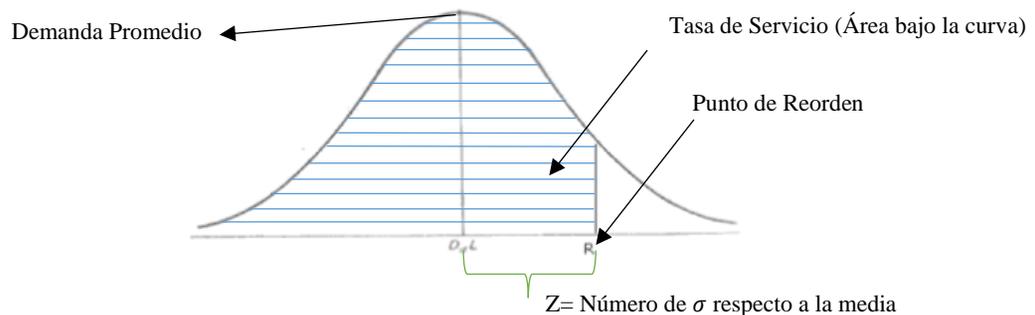
$$SS = k \cdot 1,25 \cdot MAE \cdot \sqrt{R + L}$$

Ecuación 18 Inventario de Seguridad

Donde:

k: El factor de seguridad se calcula a partir del nivel de servicio deseado.

Existen dos tipos de niveles de servicio asociados a probabilidades, tipo P1 y P2. Guerra (2014) define el nivel de servicio tipo P1, como la probabilidad de que la demanda no exceda la cantidad disponible en el punto de reorden, siendo igual a la parte izquierda del área bajo de la curva del punto de orden (Gráfica 9).



Gráfica 9 Distribución normal y Tasa de Servicio P1. Fuente: Adaptado de (Guerra Valverde, 2014)

Una vez definido la tasa de servicio tipo P1, se utiliza la Ecuación 19 y las tablas de distribución normal unitaria para obtener el valor de seguridad (k).

$$p_z(k) = 1 - P_1$$

Ecuación 19 Probabilidad de que la normal unitaria $z \sim N(0, 1)$ tome un valor mayor o igual que k.

Por otra parte, el nivel de servicio tipo P2 o también denominado como “tasa de llenado” o “tasa de surtido”, se define como la probabilidad de que se satisfaga una demanda con un stock a la mano (Nahmias, 2007). Se utiliza la Ecuación 20 y las tablas de la distribución normal unitaria para obtener el valor del factor de seguridad k para este tipo de servicio P2.

$$G_z(k) = \frac{D \cdot R}{\sigma_{(R+L)}} (1 - P_2)$$

Ecuación 20 Probabilidad de que la normal unitaria $z \sim N(0, 1)$

En la formulación actual del SOQ, no se incluye parámetros asociados a la tasa de servicio para calcular el stock de seguridad. Se destaca que el modelo de revisión periódica (R,S), tiene en cuenta la tasa de servicio en el cálculo del inventario de seguridad, asignando un valor distinto para cada grupo de clasificación.

- **CTR (Costo Total Relevante):**

El costo total relevante es calculado como la sumatoria del costo anual de ordenamiento + Costo anual de mantenimiento del inventario + Costo anual de faltantes, esta fórmula es útil para comparar diferentes políticas de control de inventario (Vidal, 2010).

Casos Aplicados:

La empresa Lenmex Corporation S.A.C, comercializadora de productos en Perú, desarrolló una propuesta de modelo probabilístico de revisión periódica, en el cual determinó los periodos de revisión, cantidad óptima a pedir, para posteriormente calcular la optimización de lotes de pedidos según los costos logísticos (Pastor Quiste & Javez Valladarez, 2007). Por otra parte, investigadores colombianos han abordado estudios de modelos revisión periódica con demanda estacional, que, mediante modelos de simulación en ProModel, realizaron modificaciones al modelo tradicional (R,S) (Velez & Castro, 2002).

Van Donselaar et al. (2011) desarrollaron estudios para determinar el inventario de seguridad ante ventas perdidas en modelos de reposición periódica. Wan et al. (2018) proporcionaron evaluaciones de costos para un sistema de inventario con revisión periódica y política de racionamiento. Bischak et al. (2014) abordaron la revisión periódica (R, S), junto a la evaluación de plazos de entrega

variables, que, mediante la simulación, se obtuvieron modelos para encontrar los valores de R y S que proporcionen un costo esperado cercano al costo mínimo.

En una empresa de eléctricos fue aplicado el modelo de revisión periódica (R, S), donde se obtuvieron resultados positivos, ya que se redujeron los déficits de inventarios y se logró un equilibrio entre los costos de mantener el inventario y la tasa de servicio para ítems críticos (Gutiérrez, Panteleeva, Hurtado, & González, 2013).

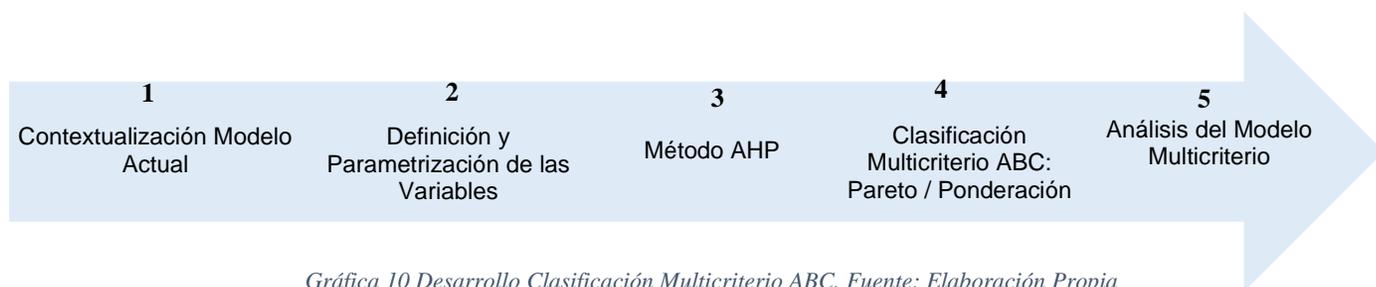
6 Modelo de Clasificación ABC Multicriterio

En el diseño del modelo de gestión de inventarios, se propone reemplazar el actual sistema de clasificación unicriterio, el cual utiliza una variable en su parametrización, por un modelo multivariable. El modelo multicriterio propuesto tendría en cuenta variables adicionales y relevantes para la gestión de inventarios.

Se aclara que la propuesta se limitará a los grupos de inventario A, B, C, D, E, F, G, es decir los inventarios Vivos y Durmientes (17,000 ítems), con esta delimitación, se evaluaría el grupo más significativo del inventario y no se abarcaría, en esta primera fase de estudio, las más de 26,000 referencias del inventario.

La propuesta involucraría pasar de 7 grupos de inventario (A, B, C, D, E, F y G) a tan solo 3 categorías del modelo multicriterio (A,B,C). Lo anterior, ayudaría a enfocar los esfuerzos de la administración en la gestión de los ítems clasificados bajo el grupo A multicriterio. El enfoque actual de clasificación A, únicamente abarca 195 productos que representa el 27% de las ventas y 23% del costo del inventario. Adicionalmente, para los grupos actuales, no existen parámetros de cortes óptimos que permitan una adecuada clasificación del inventario.

Se propone el siguiente modelo de cinco etapas para la ejecución de la propuesta de clasificación multicriterio:



- **Etapas 1: Contextualización del Modelo Actual**

En esta primera etapa se obtiene la información de las políticas actuales y los datos disponibles por cada ítem, así se definen las posibles variables a utilizar en la clasificación multicriterio.

- **Etapa 2: Definición de Variables Multicriterio**

En esta etapa se definen las variables, que surgieron de la revisión de literatura y del juicio de valor de las personas relacionadas con el área de control de inventarios de la organización. Para cada una de las variables se definió la forma de obtención, formulas, unidades y rangos de puntuación.

- **Etapa 3: Método: Proceso Analítico Jerárquico (AHP)**

Para esta etapa se utilizó el método de Proceso Analítico Jerárquico (AHP), propuesto por Thomas L. Saaty, para determinar la participación porcentual e importancia de cada una de las variables evaluadas. El proceso AHP involucra las siguientes actividades:

- 1) Construcción de las jerarquías
- 2) Establecimiento de prioridades
- 3) Revisión de la consistencia lógica

- **Etapa 4: Clasificación Multicriterio ABC: Pareto / Ponderación**

Una vez se obtiene la participación porcentual de cada criterio, se define la forma de ponderación de cada referencia en una escala numérica definida. Por lo tanto, cada ítem recibiría una calificación total, la cual sería la suma de la calificación de cada variable, multiplicado por su participación porcentual. Para determinar los cortes de la clasificación, se utilizó el Principio de Pareto, el cual es ampliamente estudiado en la literatura.

- **Etapa 5: Análisis del Modelo Multicriterio**

Finalmente se interpreta los datos obtenidos y se realiza la comparación frente al modelo actual de clasificación.

6.1 Definición de Variables Multicriterio

Se definieron los siguientes criterios para desarrollar la propuesta de clasificación multicriterio: Utilidad Unitaria, Variabilidad, Importancia y MAD*. Los criterios seleccionados, consideran algunas de las variables encontradas en la revisión de la literatura de (Roda, Macchi, & Fumagalli, 2014), (Flores & Whybark, 1987) y (Castro, Velez, & Castro, 2011). La escogencia final de los 4 criterios fue basada en una decisión administrativa. Cada uno de los criterios tiene su respectiva formulación y/o consideraciones, con el fin de generar una escala de calificación numérica.

No se tuvo en cuenta otros criterios, por ejemplo, el lead time, que es frecuentemente utilizado en la literatura, ya que este tipo de información no es recopilado de forma exacta por la organización.

En la Tabla 11, se presenta la formulación de las 4 variables que serán tenidas en cuenta:

No.	Criterio	Descripción	Fórmula	Unidades
1	Utilidad Unitaria	Utilidad Unitaria por ítem	Utilidad Unitaria = Precio de Venta Unitario (\$) - Costo Unitario (\$)	COP
2	Variabilidad	Desviación estándar para una muestra de datos de ventas	Desviación Estándar = $\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n - 1)}}$ Donde: { x_i } = valores registrados de las ventas para cada mes \bar{x} = media de la muestra de ventas n=12 meses de la muestra de ventas	Mes
3	Importancia	Importancia por grupos de repuestos	Los productos están asociados en la base de datos a un grupo de repuestos, algunos de los grupos son: carrocería, eléctricos, motor, entre otros (Tabla 17). Para cada grupo de repuestos y mediante un juicio de valor, se le asignó un valor de importancia.	-
4	MAD*	Ventas promedio para 6 meses	$= \frac{(N - 1) + (N - 2) + (N - 3) + (N - 4) + (N - 5) + (N - 6)}{6}$ Donde: N=Mes actual	Mes

Tabla 11 Criterios Propuesta de Clasificación Multicriterio ABC. Fuente: Elaboración Propia

6.2 Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

El Proceso Analítico Jerárquico (AHP), propuesto por Thomas L. Saaty, es una herramienta aplicable en la gestión de las operaciones y útil para la toma de decisiones. El método AHP es una técnica, que, a partir de un objetivo y criterios de decisión, permite realizar una comparación entre criterios y luego desarrollar un proceso de jerarquización de las alternativas. Esta herramienta de decisión es aplicable para cualquier campo y es de gran ayuda, especialmente cuando existen aspectos cualitativos difíciles de valorar. Saaty (1997) en su libro “Toma de decisiones para líderes”, indica como el método AHP proporciona una estructura eficaz para la toma de decisiones, además lo relaciona como una herramienta para abordar sistemas complejos.

Iniciando el proceso de aplicación del método AHP, se utilizó la matriz de comparación de pares (Tabla 12) para realizar la evaluación de los cuatro criterios: Utilidad Unitaria, Variabilidad, Importancia y MAD*.

C	A ₁	A ₂	xxx	A ₇
A ₁	1	5	...	
A ₂	1/5	1		
⋮	⋮			
A ₇				1

Tabla 12 Modelo AHP: Matriz de Comparación por Pares. Fuente: (Saaty, 1997)

Donde A_n =representa cada uno criterios a valorar.

Para el desarrollo de la jerarquización, Saaty propuso una escala fundamental de comparación, con el propósito de evaluar cada uno de los criterios en términos de una escala numérica.

A continuación, se relaciona la construcción de la matriz de comparación de pares y el resultado de las matriz normalizada (Tabla 13). Para determinar la comparación de los pares, se utilizó el juicio de valor de tres empleados de la compañía involucrados en el área de Control de Inventarios. La primera persona tiene el cargo de jefe (Ingeniera Industrial) y las otras dos son analistas (Administrador de Empresas / Ingeniero Mecánico), estas personas cuentan con una experiencia de más de 5 años en el sector de abastecimiento, específicamente en el área automotriz.

		1	2	3	4	MATRIZ NORMALIZADA			PROMEDIO	RANKING
	Criterios	Utilidad	Variabilidad	Importancia	MAD					
1	Utilidad	1	3	1/3	1/5	0.11	0.19	0.06	12%	3
2	Variabilidad	1/3	1	1/5	1/7	0.04	0.06	0.04	6%	4
3	Importancia	3	5	1	1/4	0.32	0.31	0.18	24%	2
4	MAD	5	7	4	1	0.54	0.44	0.72	58%	1
	Suma	9.33	16.00	5.53	1.59					

Tabla 13 Desarrollo Modelo AHP: Matriz de Juicios. Fuente: Elaboración Propia

Basados en el desarrollo de la matriz de juicios, se calculó la jerarquización de los criterios y la participación de cada variable:

N° Criterio	Descripción	Vector promedio	Nomenclatura	Priorización
1	Utilidad Unitaria	12%	WU	3
2	Variabilidad	6%	WD	4
3	Importancia	24%	WI	2
4	MAD*	58%	WM	1

Tabla 14 Desarrollo Modelo AHP: Resultado Matriz de Juicio. Fuente: Elaboración Propia

Para validar la consistencia de los juicios de valor, el modelo propone un análisis de consistencias. El cálculo de consistencia es un índice que determina qué tan aceptable son los juicios de valor utilizados por las personas involucradas en el desarrollo del ejercicio. Para determinar si los juicios de valor son razonables, el cálculo del índice CR, debe dar inferior al 10%.

- CR: Relación de Consistencias

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

Ecuación 21 Medida de Relación de Consistencia

- CI: Índice de Consistencia

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

Ecuación 22 Índice de Consistencia

- RI: Índice Aleatorio

$$RI = \frac{1.98(n - 2)}{n}$$

Ecuación 23 Ratio de Consistencia

Donde:

n=el número de filas o columnas de la matriz

λ =vector propio principal de la matriz de comparación por pares.

Se calcularon los siguientes resultados para la relación de consistencias (Tabla 15). La relación de consistencias arrojó un valor inferior al 10%, lo que indica que la matriz fue desarrollada con juicios razonables y racionales.

	Cálculos Índices
CI: Índice de Consistencia	0.096
RI: Consistencia Aleatoria	0.99
CR: Relación de Consistencia	9.7%

Tabla 15 Cálculo Índices de Consistencia. Fuente: Elaboración Propia

6.3 Calificación de Criterios

Para obtener una calificación de los ítems analizados, es necesario asignar una escala numérica para cada una de las variables. Se define la siguiente escala numérica junto a la clasificación del tipo de variables: objetivas o subjetivas.

N° Criterios	Descripción	Escala	Variable
1	MAD*	0-5	Objetiva
2	Importancia	0-5	Subjetiva
3	Utilidad Unitaria	0-5	Objetiva
4	Variabilidad	0-5	Objetiva

Tabla 16 Clasificación Multicriterio ABC: Escala Numérica. Fuente: Elaboración Propia

Se utilizaron las siguientes formulas y/o consideraciones para ponderar cada uno de los criterios:

- 1) **Calificación Utilidad Unitaria (CU_i):** Cifra en pesos que representa la utilidad unitaria de cada ítem.

$$CU_i = \frac{U_i - \text{Min}(U_i)}{\text{Max}(U_i) - \text{Min}(U_i)} * 5$$

Ecuación 24 Calificación Utilidad Unitaria

Donde:

CU_i : Calificación de la utilidad unitaria del ítem

U_i : Utilidad unitaria por ítem i

$\text{Min}(U_i)$: Mínimo valor de los ítems de estudio

$\text{Max}(U_i)$: Máximo valor de los ítems de estudio

- 2) **Calificación de la Variabilidad (CD_i):** Representa la desviación estándar de las ventas de los últimos 12 meses por cada ítem.

$$CD_i = \frac{D_i - \text{Min}(D_i)}{\text{Max}(D_i) - \text{Min}(D_i)} * 5$$

Ecuación 25 Calificación Desviación Estándar

Donde:

CD_i : Calificación de la desviación estándar del ítem

D_i : Desviación estándar muestral del ítem i

$\text{Min}(D_i)$: Mínimo valor de los ítems de estudio

$\text{Max}(D_i)$: Máximo valor de los ítems de estudio

- 3) **Calificación de la Importancia del repuesto (CI_i):** Cada grupo de repuestos tiene definida una importancia, con una posible calificación entre 0 a 5. La importancia es un valor subjetivo definido por la administración (Tabla 17).

#	Grupo	Importancia	Ejemplos
1	MANUALES	0	Manuales de Propietario
2	MERCHANDIZING	0	Publicidad
3	(RE) BOUTIQUE	0.5	Camisas, gorras, llaveros
4	HERRAMIENTAS	0.5	Llave (Herramientas Manuales)
5	VARIOS	0.5	Otros
6	ACCESORIOS	1.5	Tiros de Arrastre, seguro de ruedas
7	GENERAL-MIXTURA	2.5	Tornillos, arandelas
8	(RE) ACCESORIOS DE CARROCERIA	3	Ítems Version Especiales
9	ACEITES	3	Aceite de Motor o Diferencial
10	QUIMICOS	3	Líquido de Frenos
11	ELECTRICIDAD	3	Cableados, sockets, bombillos
12	CONJUNTO COMPLETO	2.5	Motor, Caja Tranmisión
13	MOTOR	3.5	Radiador, boma de suministro
14	TREN POTENCIA	3.5	Ruedas, diferencial, transferencia
15	CARROCERIA	4	Costados, bompers, compuertas
16	KEY PRODUCTS	5	Filtros, pastillas de freno

Tabla 17 Clasificación Multicriterio ABC: Importancia Grupos de Repuestos. Fuente: Elaboración Propia

- 4) **Calificación MAD* (CM_i):** Calificación basada en las ventas de los últimos 6 meses.

Se encontró que el método de ponderación, utilizado para los otros criterios, generaba una brecha significativa para esta calificación; lo anterior es generado a los valores máximos registrados del MAD* (Máximo 6,728 UN y mínimo 0 UN). Teniendo en cuenta lo anterior, se propone definir unos rangos para clasificar los productos en una escala numérica de 0 a 5 (Tabla 18). Para la calificación máxima (5), se tomó el valor de 20UN, bajo la premisa, que los ítems con esta calificación tuvieran por lo menos una venta diaria durante todos los días hábiles del mes.

Rangos MAD* (Unidades)	Calificación
$MAD^* = 0$	0
$0 < MAD^* \leq 2.5$	0,5
$2.5 < MAD^* \leq 5$	1
$5 \leq MAD^* \leq 10$	2
$10 \leq MAD^* \leq 15$	3
$15 < MAD^* \leq 20$	4
$MAD^* > 20$	5

Tabla 18 Rango Clasificación MAD*. Fuente: Elaboración Propia

Una vez evaluados cada uno de los criterios, es necesario obtener una calificación total por cada ítem evaluado. Para esto se realiza el cálculo de una calificación total, cuya fórmula considera de manera simultánea todas las variables definidas junto a su participación porcentual.

$$CT_i = CI_i * WI + CD_i * WD + CU_i * WU + CM_i * WM$$

Ecuación 26 Calificación Total: Clasificación Multicriterio ABC

Donde:

CT_i: Calificación total del ítem i.

7 Propuesta: Clasificación ABC Multicriterio

Una vez se genera el cálculo con la calificación total para las 17,157 referencias, estas se ordenan de mayor a menor y se clasifican bajo las siguientes consideraciones:

- El 20% de los primeros ítems serán clasificados como tipo A.
- Entre el 20% y 50% de los siguientes productos serán clasificados como tipo B.
- El 50% de líneas restantes tendrán la clasificación tipo C.

Propuesta Clasificación ABC		Δ
A	0-20%	20%
B	20%-50%	30%
C	50-100%	50%

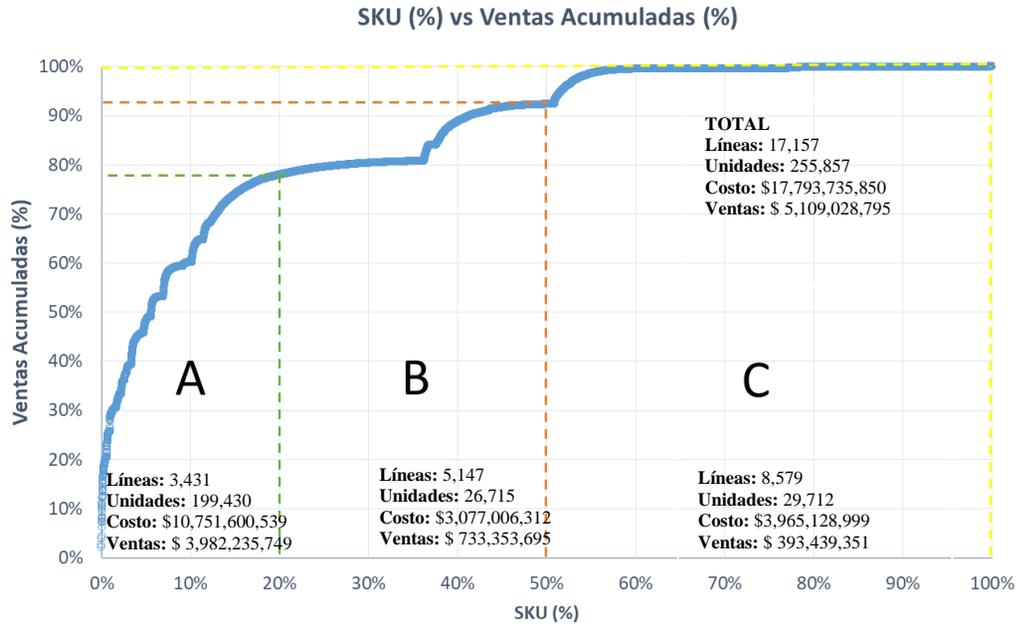
Tabla 19 Propuesta Clasificación Multicriterio ABC: Porcentajes. Fuente: Elaboración Propia

A partir de la nueva clasificación, se grafica el porcentaje de líneas vs. las ventas acumuladas (Gráfica 11). El 20% de las referencias del nuevo grupo A (3,431 referencias), generaron el 78% de las ventas y representaron el 60% del costo del inventario. Dado a lo anterior, el modelo propuesto, se ajusta al Principio de Pareto (80/20). Wild (2017) manifestó que este análisis es un principio de gestión importante, que puede ser aplicado para minimizar el esfuerzo y obtener los mejores resultados en la administración de inventarios. Flores & Whybark (1986), Wild (2017) y Vidal (2010), concluyen que el mayor esfuerzo debe dirigirse a la administración de los elementos del grupo A, que son los más importantes para la gestión del inventario. Los mejores resultados en la administración del inventario se obtienen organizando los esfuerzos correctamente, ya que no existe tiempo suficiente para mantener un control detallado de todos los elementos individuales del inventario (Wild, 2017).

A partir la clasificación multicriterio, se relaciona el siguiente resumen, el cual incluye las líneas, unidades, costos y ventas para cada grupo generado (Tabla 20).

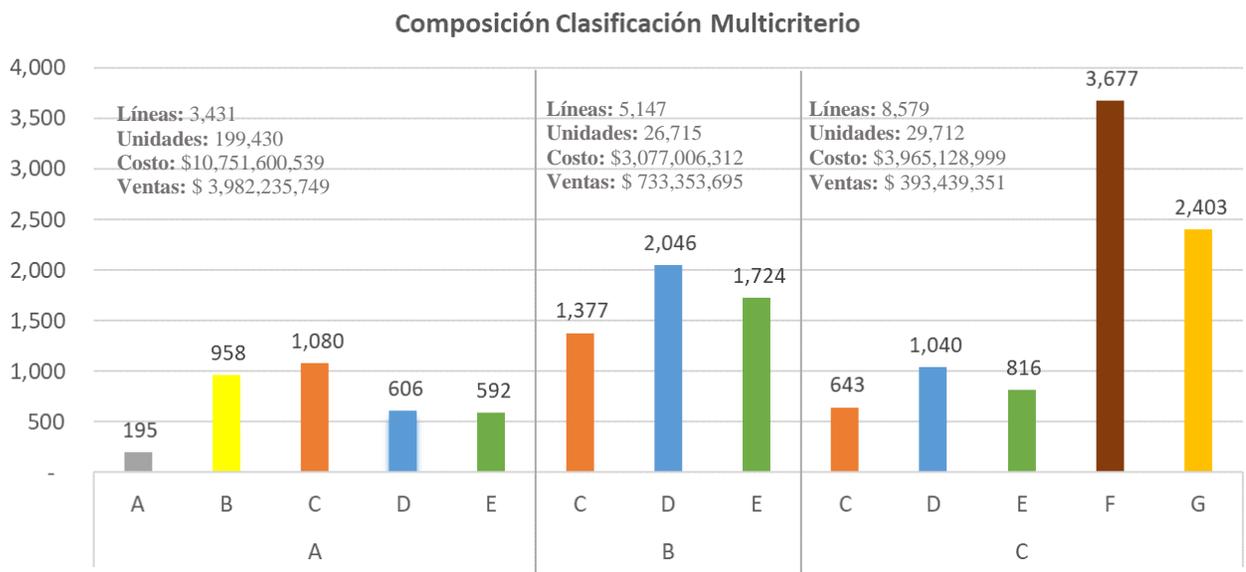
Grupo	SKU	% SKU	Unidades	% Unidades	\$ Ventas	% Ventas	\$ Costos	% Costos
A	3.431	20%	199.430	78%	\$3,982,235,749	77.90%	\$ 10,751,600,539	60%
B	5.147	30%	26.715	10%	\$ 733,353,695	14.40%	\$ 3,077,006,312	17%
C	8.579	50%	29.712	12%	\$ 393,439,351	7.70%	\$ 3,965,128,999	22%
TOTAL	17.157	100%	255.857	100%	\$ 5,109,028,795	100%	\$ 17,793,735,850	100%

Tabla 20 Grupos Clasificación Multicriterio ABC *COP. Fuente: Elaboración Propia



Gráfica 11 Clasificación Multicriterio ABC: SKU Vs Ventas Acumuladas. Fuente: Elaboración Propia

La Gráfica 12 representa la composición de los grupos obtenidos entre los 7 grupos actuales (A, B, C, D, E, F y G). De forma general, se aprecia que en el grupo A quedaron parte de los grupos actuales A, B y C; para el grupo B, quedaron parte del C, D y E y finalmente en el grupo C quedaron concentrados ítems de los grupos F y G.



Gráfica 12 Comparación Clasificación Actual vs Multicriterio. Fuente: Elaboración Propia

Estado de BO - Tasa de Servicio por Grupo de Clasificación Multicriterio

A partir de la clasificación multicriterio, se calcularon las líneas y unidades en backorder, esto con el objetivo de determinar qué grupo presenta los mayores ítems agotados durante los meses de revisión. Se entiende por backorder (BO), cómo las unidades pendientes de despacho por falta de inventario a la mano. En la Tabla 21, se aprecia que el grupo A (43.1% en líneas y 66% en unidades) y B (33.6% en líneas y 16% en unidades) presentaron la mayor participación del backorder. El enfoque de la revisión de los grupos A y B debe conllevar a la causa raíz de los quiebres de inventario, para así determinar acciones que conlleven su disminución.

Inventario	Clasificación	Líneas BO	% Líneas BO	Unidades BO	% Unidades BO
Repuestos	Clasificación A	362	43%	1,780	66%
	Clasificación B	282	34%	436	16%
	Clasificación C	196	23%	489	18%
	TOTAL	840	100%	2,705	100%

Tabla 21 Grupos Clasificación Multicriterio ABC: BO. Fuente: Elaboración Propia

A partir de las 840 líneas en BO, se calcula la tasa de servicio tipo P2 para los tres grupos multicriterio. La Tabla 22 relaciona la importancia del grupo A frente a las unidades solicitadas, atendidas y pendientes por despacho (BO). Se considera que un enfoque en las líneas de este grupo generaría un incremento en la tasa de servicio y por ende un aumento en los niveles de ventas.

		Cantidad Solicitada (UN)	Cantidad Atendida (UN)	BO (UN)
Tasa Servicio A %	97,3%	65,457	63,677	1,780
Tasa Servicio B %	90,2%	4,454	4,018	436
Tasa Servicio C %	84,5%	3,150	2,661	489
	TOTAL	73,061	70,356	2,705

Tabla 22 Tasa de servicio P2 para la Clasificación Multicriterio. Fuente: Elaboración Propia

Para calcular las ventas que no se generaron al cierre del periodo de revisión del grupo A multicriterio, por efecto de la no disponibilidad, se calcula que este valor representa el 4% de las ventas totales de repuestos. Se aclara que el sistema de pedidos actual no permite el registro de ventas perdidas por agotamiento de ítems del inventario, por lo que estos valores no son tenidos en cuenta en este documento.

Una vez generada la clasificación multicriterio, se sugiere a la empresa realizar las siguientes actividades:

- El grupo A multicriterio identificó las piezas que generan el mayor impacto para las ventas de la compañía; adicionalmente se determinó, que este grupo tiene la mayor participación tanto de pedidos como en unidades agotadas. Por ende, se debe determinar la causa raíz de los quiebres de inventario e implementar seguimiento y planes de acción para estos ítems.
- Se recomienda para el modelo de clasificación multicriterio un ajuste semestral de la clasificación, esto con el objetivo de revisar el comportamiento de los productos y no generar inconvenientes con productos estacionales o que presenten variabilidad debidos a cambios de categoría.
- Se sugiere realizar un corte de los pedidos de los concesionarios (*cut-off*), basados en que los despachos se realicen según demanda diaria promedio (DAD). Al generarse este corte, se evita que los pedidos irregulares (por fuera de la demanda promedio) y en cantidades que excedan de forma considerable la demanda general, sean despachados y genere agotados para las demás sucursales.
 - Medición de ventas perdidas según grupo de clasificación.
 - Definición de los objetivos de meses de inventario y rotación para los nuevos grupos obtenidos.
 - Realizar un proceso de optimización entre la tasa objetiva para cada grupo y los parámetros de seguridad y meses de inventario.
 - Monitorear el inventario de baja y nula rotación, así como los repuestos que están saliendo de fase, con el fin de generar estrategias comerciales para disminuir y controlar el inventario de baja y nula rotación.

7.1 Categoría A Multicriterio

El grupo A multicriterio está compuesto por 3,431 ítems (20% del total de referencias) y 199,430 unidades (78% del total de unidades stock); representando un costo total del 60% y ventas del 78% (Tabla 23).

Grupo	SKU	% SKU	Unidades	% Unidades	\$ Ventas	%Ventas	\$ Costos	% Costos
A	3,431	20%	199,430	78%	\$3,982,235,749	77.9%	\$10,751,600,539	60%

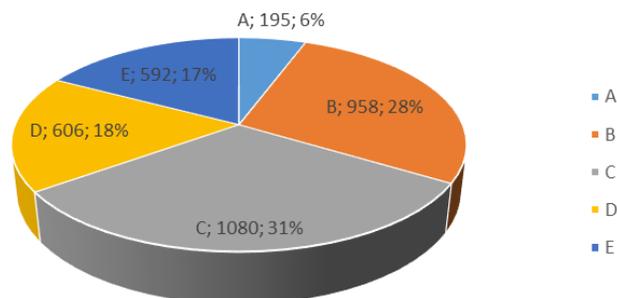
Tabla 23 Datos Clasificación Multicriterio ABC: Grupo A. Fuente: Elaboración Propia

Para el análisis de los ítems del grupo A multicriterio, se encuentra la siguiente participación de líneas del grupo actual A, B, C, D y E, de los cuales el grupo A, B y C son los más importantes, ya que generan el 93% de las ventas y representan el 83% del costo del grupo A.

Grupo	SKU	% SKU	Unidades	% Unidades	Ventas	% Ventas	Costos	% Costos
A	195	6%	142,073	71%	\$ 1,379,190,790	35%	\$ 3,579,758,445	33%
B	958	28%	39,308	20%	\$ 1,313,270,008	33%	\$ 2,712,904,202	25%
C	1,080	31%	14,059	7%	\$ 988,493,296	25%	\$ 2,711,077,678	25%
D	606	18%	2,523	1%	\$ 229,130,475	6%	\$ 1,204,675,230	11%
E	592	17%	1,453	1%	\$ 72,151,180	2%	\$ 543,184,984	5%
Total general	3,431	100%	199,430	100%	\$ 3,982,235,749	100%	\$ 10,751,600,539	100%

Tabla 24 Clasificación Actual Vs Multicriterio: Grupo A. Fuente: Elaboración Propia

Composición Clasificación Multicriterio: Grupo A



Gráfica 13 Composición Clasificación Multicriterio : Grupo A. Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se relaciona el análisis para el grupo A multicriterio:

- Grupo A actual (195 SKU): Todas las líneas quedaron ubicadas en el grupo A multicriterio. Se aprecia que la cantidad de ítems del grupo corresponden a un número mínimo frente al total de referencias (17,157 SKU), representando solo el 6% del total de líneas. Se encuentra relevante los siguientes grupos de repuestos: Key Products (filtros (aire, aceite, cabina, combustible), plumillas, pastillas de freno) y Mixtura, que involucra empaques, sellos y bombillos.
- Grupo B actual (958 SKU): Todos los SKU quedaron ubicados en este grupo A multicriterio. En los ítems clasificados se encuentran partes con movimiento alto/medio de carrocería (colisión: latonería), eléctricos (colisión: faro delantero y trasero), tren de potencia (reparación) y motores (reparación).
- Grupo C y D actual (1,080 SKU / 606 SKU): El 35% de líneas del grupo C y el 16% del D quedaron clasificados en el grupo A multicriterio.
- Grupo E actual (592UN): El 19% de líneas del grupo E quedaron clasificadas en el grupo A multicriterio; estos ítems tienen un nivel alto de importancia y un MAD*=0.17UN, es decir una venta en los últimos seis meses.

Para finalizar el análisis del grupo A multicriterio, la Tabla 25 muestra la participación total según el grupo de repuestos. Los repuestos de Carrocería, Key Products y Tren de Potencia resultaron ser los de mayor importancia, generando el 79% de las ventas.

Grupos	SKU	% SKU	Unidades	% Unidades	Ventas	% Ventas	Costos	% Costos
Carrocería	2,081	61%	29,210	15%	\$ 1,368,940,148	34%	\$ 4,123,084,391	38%
Key Products	336	10%	69,539	35%	\$ 1,147,466,772	29%	\$ 3,439,661,216	32%
Tren Potencia	318	9%	13,280	7%	\$ 614,964,333	15%	\$ 1,276,046,690	12%
Electricidad	179	5%	3,083	2%	\$ 341,566,970	9%	\$ 649,729,992	6%
Motor	172	5%	32,979	17%	\$ 226,506,877	6%	\$ 517,209,701	5%
General / Mixtura	326	10%	40,187	20%	\$ 97,684,422	2%	\$ 238,243,214	2%
Quimicos	4	0%	8,905	4%	\$ 109,564,195	3%	\$ 232,738,898	2%
Conjunto Completo	5	0%	14	0%	\$ 37,465,171	1%	\$ 216,504,092	2%
Aceites	10	0%	2,233	1%	\$ 38,076,862	1%	\$ 58,382,345	1%
Total general	3,431	100%	199,430	100%	\$ 3,982,235,749	100%	\$ 10,751,600,539	100%

Tabla 25 Clasificación Multicriterio A: Grupo de Repuestos. Fuente: Elaboración Propia

7.2 Categoría B Multicriterio

El grupo B multicriterio quedó conformado por 5,147 SKU (30% del total de referencias) y 26,710 unidades (10% del total de unidades), este grupo representa el 17% del costo total y genera el 14% de las ventas de repuestos (Tabla 26).

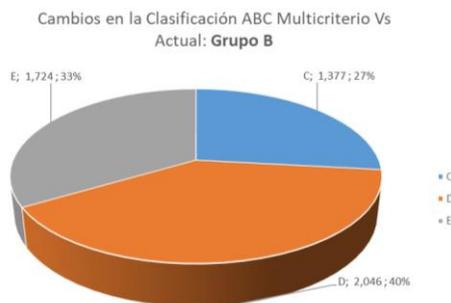
Grupo	SKU	% SKU	Unidades	% Unidades	\$ Ventas	%Ventas	\$ Costos	% Costos
B	5,147	30%	26,715	10%	\$733,353,695	14%	\$3,077,006,312	17%

Tabla 26 Datos Clasificación Multicriterio ABC: Grupo B. Fuente: Elaboración Propia

En comparación con el grupo A multicriterio, se aprecia una caída considerable en las unidades totales (Grupo A: 199,430 Unidades) y costo del inventario (Grupo A: \$10,751,600,539).

Grupos	SKU	% SKU	Unidades	% Unidades	\$ Ventas	% Ventas	\$ Costos	% Costos
C	1,377	27%	13,920	52%	\$ 407,857,316	56%	\$ 1,343,288,477	44%
D	2,046	40%	8,756	33%	\$ 252,231,572	34%	\$ 1,194,032,630	39%
E	1,724	33%	4,039	15%	\$ 73,264,806	10%	\$ 539,685,206	18%
Total general	5,147	100%	26,715	100%	\$ 733,353,695	100%	\$ 3,077,006,312	100%

Tabla 27 Clasificación Actual Vs Multicriterio: Grupo B. Fuente: Elaboración Propia



Gráfica 14 Composición Clasificación Multicriterio : Grupo B. Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 28, se observa la participación del grupo B multicriterio según el grupo de repuestos. Los grupos de repuestos de tren de potencia, motor y carrocería resultaron los más importantes, representando un porcentaje de ventas del 95% y un costo del 96%.

Grupos	SKU	% SKU	Unidades	% Unidades	Ventas	% Ventas	\$ Costos	% Costos
Tren Potencia	1,240	24%	6,137	23%	\$ 333,888,731	46%	\$ 1,443,150,352	47%
Motor	973	19%	4,628	17%	\$ 213,280,490	29%	\$ 861,181,663	28%
Carrocería	2,776	54%	12,899	48%	\$ 142,049,153	20%	\$ 633,680,362	21%
Conjunto Completo	2	0%	11	0%	\$ 24,835,287	3%	\$ 78,345,571	3%
General / Mixtura	154	3%	3,031	11%	\$ 12,074,513	2%	\$ 36,824,703	1%
Total general	5,147	100%	26,715	100%	\$ 726,128,174	100%	\$ 3,053,182,650	100%

Tabla 28 Clasificación Multicriterio B : Grupo de Repuestos. Fuente: Elaboración Propia

7.3 Categoría C Multicriterio

El grupo C multicriterio quedó conformado por 8,579 SKU (50% del total de referencias), que representa 29,712 unidades (12% del total), un costo del 22% del valor total del inventario y ventas del 7.7% (Tabla 29).

Grupo	SKU	% SKU	Unidades	% Unidades	\$ Ventas	%Ventas	\$ Costos	% Costos
C	8,579	50%	29,712	12%	\$393,439,351	7.7%	\$3,965,128,999	22%

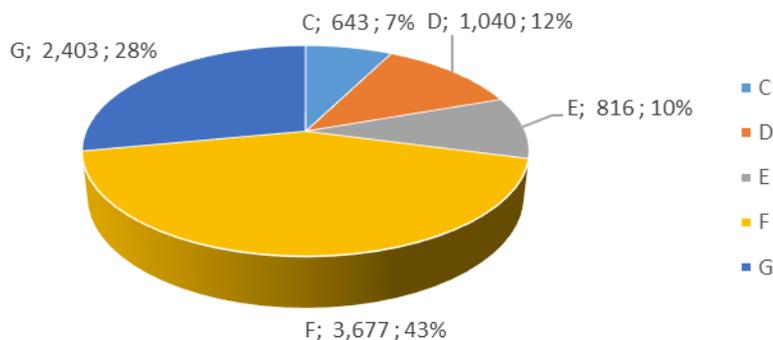
Tabla 29 Datos Clasificación Multicriterio ABC: Grupo C. Fuente: Elaboración Propia

Para el análisis de los ítems clasificados en el grupo C multicriterio, se encuentra la participación de líneas del grupo actual C, D, E, F y G, donde el 71% de las referencias no han tenido movimiento en los últimos 6 meses ($MAD^*=0$), el restante de SKU tienen valores intermedios de $MAD^*<4.33UN$, con características de poca importancia y baja utilidad.

Grupos	SKU	% SKU	Unidades	% Unidades	\$ Ventas	% Ventas	\$ Costos	% Costos
C	643	7%	6,452	22%	\$ 224,689,810	57%	\$ 759,998,568	19%
D	1,040	12%	4,931	17%	\$ 121,482,543	31%	\$ 601,275,363	15%
E	816	10%	2,135	7%	\$ 39,827,333	10%	\$ 301,483,244	8%
F	3,677	43%	11,046	37%	\$ 7,439,664	2%	\$ 1,544,577,840	39%
G	2,403	28%	5,148	17%	\$ -	0%	\$ 757,793,984	19%
Total general	8,579	100%	29,712	100%	\$ 393,439,351	100%	\$ 3,965,128,999	100%

Tabla 30 Clasificación Actual Vs Multicriterio : Grupo C. Fuente: Elaboración Propia

Cambios en la Clasificación ABC Multicriterio Vs Actual: Grupo C



Gráfica 15 Composición Clasificación Multicriterio : Grupo C. Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 31 se presenta la participación los ítems, según el grupo de repuestos. Los grupos de repuestos de electricidad, carrocería y tren de potencia resultaron los más relevantes, representando un porcentaje de ventas del 87% y un costo del 84%.

Grupos	SKU	% SKU	Unidades	% Unidades	\$ Ventas	% Ventas	\$ Costos	% Costos
Electricidad	2,613	30%	8,495	29%	\$ 342,447,351	87%	\$ 1,917,176,817	48%
Carrocería	2,780	32%	6,119	21%	\$ -	0%	\$ 841,503,010	21%
Tren Potencia	1,045	12%	2,715	9%	\$ 956,024	0%	\$ 537,906,752	14%
Motor	764	9%	2,254	8%	\$ 348,657	0%	\$ 326,204,887	8%
Conjunto Completo	17	0%	37	0%	\$ 25,041,512	6%	\$ 200,393,745	5%
General / Mixtura	1,292	15%	9,766	33%	\$ 18,612,725	5%	\$ 105,289,767	3%
Accesorios	8	0%	65	0%	\$ 2,750,546	1%	\$ 27,871,136	1%
Herramientas	52	1%	234	1%	\$ 3,282,535	1%	\$ 8,227,544	0%
Manuales y Catálogo	8	0%	27	0%	\$ -	0%	\$ 555,341	0%
Total General	8,579	100%	29,712	100%	\$ 393,439,351	100%	\$ 3,965,128,999	100%

Tabla 31 Clasificación Multicriterio C: Grupo de Repuestos. Fuente: Elaboración Propia

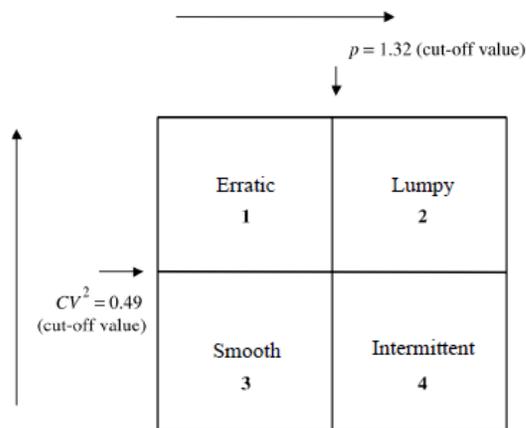
8 Propuesta: Modelo de Pronóstico por Grupo Multicriterio

En el desarrollo del diseño del modelo de gestión de inventarios, se propone la aplicación de métodos de pronósticos para unas muestras de referencias de los diferentes grupos de repuestos. Por el alto número de ítems del inventario, cerca de 26,000 referencias, y debido a los tiempos y costos computacionales, en esta etapa no es viable desarrollar el modelo para todas las referencias del inventario.

A partir de la propuesta de clasificación de Syntetos, Boylan, & Croston (2005), se utilizó un histórico de 7 años con los valores mensuales de las ventas para generar la clasificación. Por medio del programa R-Studio, se probaron diferentes modelos de series de tiempo: ETS, ARIMA, Redes Neuronales, Promedios Móviles, Holts- Winters y Croston. A partir del error absoluto medio (MAE), se evaluó el desempeño de los modelos utilizados.

8.1 Clasificación de Grupos de Pronóstico

Las muestras de ítems se escogieron de los diferentes grupos de repuestos (ej. Motor, Tren de Potencia, Carrocería, etc.) que se encuentran segmentados en la base de datos. Posteriormente los ítems fueron clasificados en uno de los patrones de demanda propuestos por Syntetos et al. (2005). Los autores proponen cuatro grupos de clasificación para generar pronósticos (Estable, Errático, Irregular e Intermitente) y los cortes basados en los cálculos del Coeficiente de Variación (CV^2) y el Intervalo Promedio entre Demandas (ρ) (Gráfica 16).



Gráfica 16 Clasificación Pronóstico: Patrones de Demanda. Fuente: Syntetos et al (2005)

Para explicar el proceso del cálculo y determinación del patrón de demanda, se utilizó dos referencias a conveniencia:

- **Filtro de Aceite: 04152YZZA5**

A partir de los datos de las ventas mensuales (Tabla 32), se inicia el cálculo del coeficiente de variación CV^2 (Ecuación 4) y promedio de intervalo de demandas ρ (Ecuación 5).

PN	Descripción	2019										2020	
		04152YZZA5	Filtro Aceite	195	120	60	178	222	126	93	143	239	263

Tabla 32 Datos Históricos Ventas PN 04152-YZZA5 *Cifras en Unidades. Fuente: Elaboración Propia

- Coeficiente de Variación:

$$CV^2 = \left(\frac{\sigma_x}{\bar{X}}\right)^2 = \left(\frac{60.87}{163.17}\right)^2 = 0.14$$

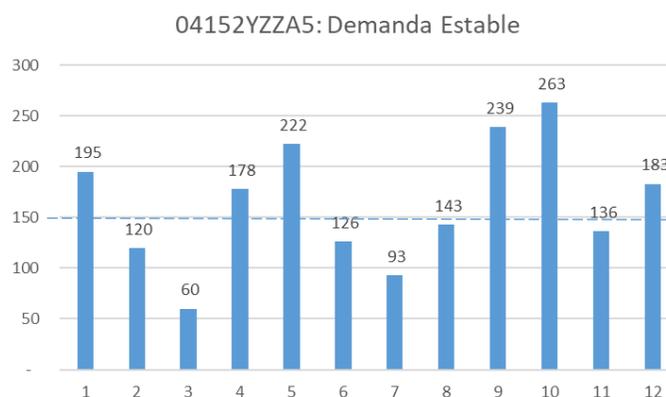
Ecuación 27 Fórmula CV^2 : Coeficiente de Variación

- Promedio de intervalo de la demanda ρ o ADI:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N} = \frac{12}{12} = 1$$

Ecuación 28 Fórmula ρ intervalo de demanda

El cálculo del coeficiente de variación y ADI nos indican que el patrón de demanda es Estable (Gráfica 19). Al validar gráficamente el comportamiento del ítem 04152YZZA5, se aprecia que los datos no tienen variaciones significativas sobre la media histórica (Gráfica 17)



Gráfica 17 Demanda Estable PN 04152-YZZA5. Fuente: Elaboración Propia

- **Protector Guardafango 5380860190**

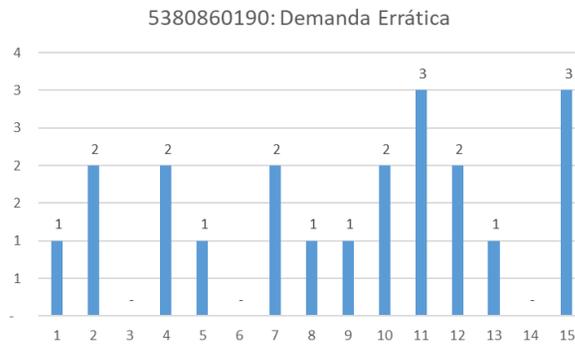
Se calcula los valores de CV^2 y ρ a partir de los datos de las ventas mensuales (Tabla 33).

PN	Descripción	2018		2019										2020		
5380860190	Protector Guardafango Izquierdo	1	2	-	2	1	-	2	1	1	2	3	2	1	-	3

Tabla 33 Histórico Datos Ventas PN 53808-60190. Fuente: Elaboración Propia

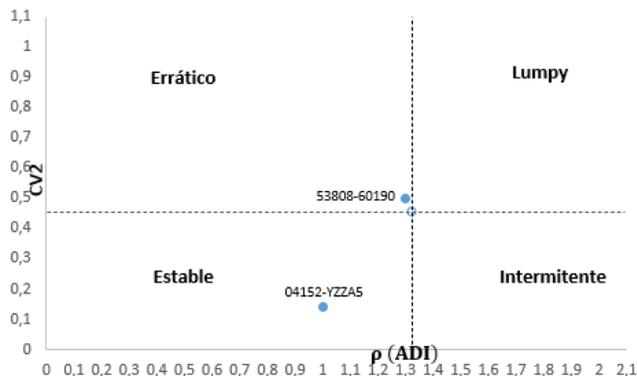
- CV^2 : Coeficiente de Variación: 0.5
- ρ o ADI: Promedio de intervalo de la demanda: 1.3

Basado en los anteriores resultados, se determina que el tipo de demanda es Errático (Gráfica 19). El comportamiento errático se caracteriza por gran variabilidad en la cantidad la demanda, siendo esta aproximadamente constante en el tiempo.



Gráfica 18 Demanda Errática PN 53808-60190. Fuente: Elaboración Propia

Para cada uno de los ítems a analizados se realizó los respectivos cálculos y definición del patrón de demanda (Gráfica 19)



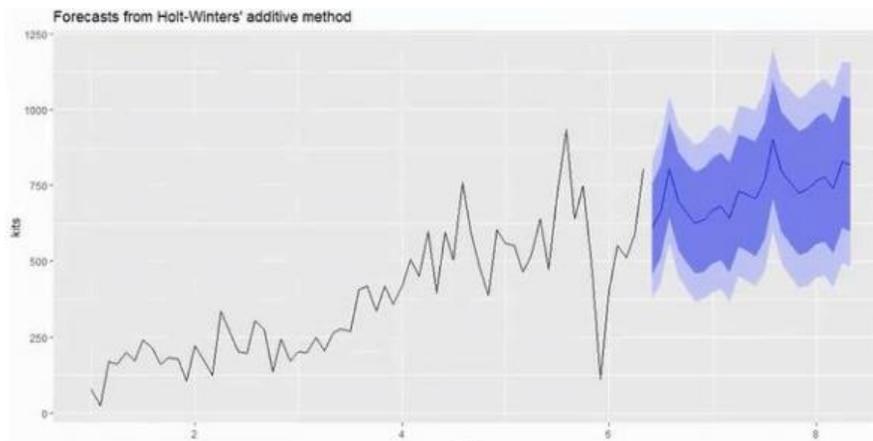
Gráfica 19 Grupos de Patrón de Demanda para muestra de SKU. Fuente: Elaboración Propia

8.2 Desarrollo del Modelo de Pronóstico

Por medio del programa R-Studio (Versión 1.4.1106), se utilizaron los paquetes disponibles para generar los resultados de los modelos de pronósticos. R-Studio, es un entorno de desarrollo de lenguaje de programación R, utilizado en la computación estadística y procesamiento de gráficos (R-Studio, s.f.).

Paquetes utilizados:

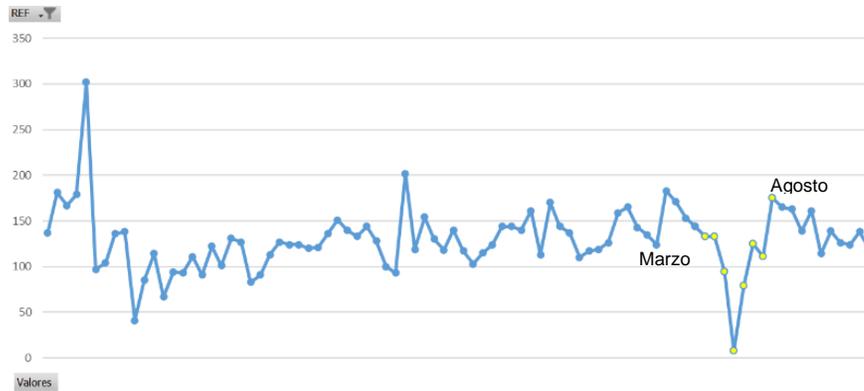
- Forecast: El pronóstico del paquete R proporciona métodos y herramientas para mostrar y analizar pronósticos de series de tiempo (Rpubs by R-Studio, s.f.).
- Readxl: Paquete diseñado para importar las hojas de Excel al programa R-Studio.
- Writexl: Exporta los datos de R a un libro de Excel.
- ImputeTS: Permite reemplazar valores no encontrados en la serie de tiempo mediante la interpolación de datos (Rpubs by R-Studio, s.f.).
- Ggplot2: Paquete de visualización de datos para el lenguaje R (Rpubs by R-Studio, s.f.). Este paquete es útil para visualizar las proyecciones de la demanda de los diferentes ítems.



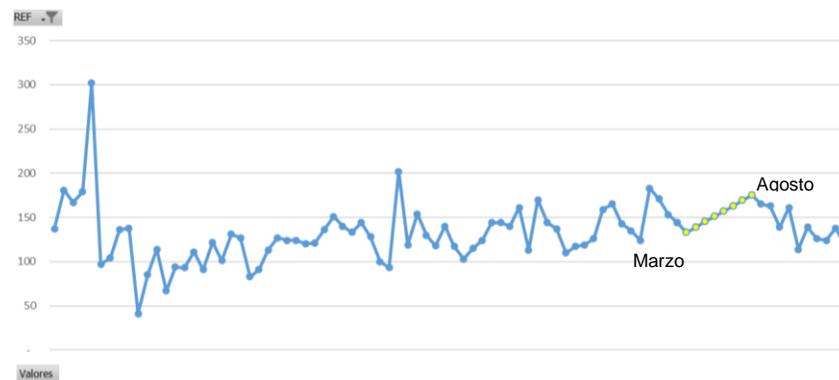
Gráfica 20 Proyección Pronóstico: Método Holt-Winters Aditiva. Fuente: Elaboración Propia

Consideraciones del Modelo de Pronóstico:

- Para el desarrollo del modelo de pronóstico se utilizó un computador con las siguientes características: Windows 11 con Procesador AMD Ryzen 7 de 64 bits.
- Las muestras para el pronóstico fueron escogidas de forma aleatoria; se tuvo en cuenta ítems de los diferentes grupos de repuestos para garantizar una amplia gama de repuestos que podrían tener diferentes características de demanda.
- Para los ítems seleccionados y dependiendo del grupo de clasificación, se utilizaron las siguientes técnicas de pronósticos: ETS, Holts-Winters, ARIMA, Redes Neuronales, Croston y Promedio móvil simple.
- Se tomó un histórico de datos de ventas que inician en Junio/2014 y finalizan en Julio/2021, lo anterior equivale a 86 meses de información. Se aclara que la empresa no registra los datos de la demanda sino de las ventas, para trabajos similares se recomienda utilizar la demanda ya que esto es una fuente de imprecisión para los pronósticos (Vidal, 2010).
- Se utilizó el error Medio Absoluto Medio (MAE), para efectos de comparación y selección del modelo de previsión. Una vez generados los pronósticos, el modelo que arroje los menores errores sería considerado el de mejor desempeño.
- Teniendo en cuenta que en el año 2020 inicio una crisis económica producto del COVID-19; la empresa presentó una caída considerable en las ventas de repuestos durante aproximadamente 6 meses (Marzo/2020 a Agosto/2020) (Gráfica 21). Durante este periodo, Colombia tuvo restricciones en la apertura del sector comercio, cuarentenas totales y sectorizadas, que, sumadas a las afectaciones del virus, generó una importante caída en la economía (PIB en -6,8% y Desempleo (3.7 Millones) (Riaño, 2021). Posteriormente en Agosto/2020, la empresa retomó las ventas promedio mensuales, producto de la reactivación económica. Para evitar que estos meses afectarían los datos históricos, se determinó realizar una interpolación de los datos con el objetivo de disminuir el efecto de datos atípicos en la generación de los pronósticos (Gráfica 22).



Gráfica 21 Histórico Datos de Ventas: Caída por efecto COVID-19 PN 9094202049. Fuente: Elaboración Propia



Gráfica 22 Interpolación Datos de Ventas: (Marzo-Agosto 2021) PN 9094202049. Fuente: Elaboración Propia

- Al revisar otros trabajos que han utilizado la clasificación para generar pronósticos, se considera importante resaltar el trabajo de Chawla et al. (2019). Para este caso la compañía, Gerber Technology, ya contaba con un sistema de pronósticos; mientras que, para la empresa automotriz, objeto de este documento, se debió desarrollar un código de programación para utilizar los paquetes disponibles en R-Studio. La programación tuvo en cuenta el alto número de ítems a pronosticar, implementado funciones para importar, de forma masiva los datos históricos, y a la vez exportar los resultados de forma organizada.
- En comparación con el documento de Chawla et al. (2019), se destaca que el trabajo propio, utilizó una metodología interesante y diferenciadora en la evaluación de pronósticos. Dicha evaluación consistió en dividir la serie de tiempo en datos de entrenamiento y prueba; los primeros datos se utilizaron para estimar los parámetros del modelo y los segundos para evaluar su precisión. La anterior es una metodología interesante, para analizar la generalización de los modelos ante nuevos datos.

8.2.1 Pronósticos Categoría A Multicriterio

El modelo de pronósticos, para el grupo A multicriterio, inició con la recolección de los datos históricos, clasificación de los repuestos según el tipo de demanda y utilización del programa R-Studio para evaluar los diferentes modelos de serie de tiempos (Diagrama 8).

Para este grupo se utilizaron los siguientes modelos de serie de tiempo: Holts-Winters, Croston, ARIMA, Redes Neuronales y ETS, esto con el propósito de abarcar una amplia gama de modelos y encontrar el de mejor desempeño. Vidal (2010) recomienda, para esta categoría A, la aplicación de técnicas de pronósticos relativamente complejas.

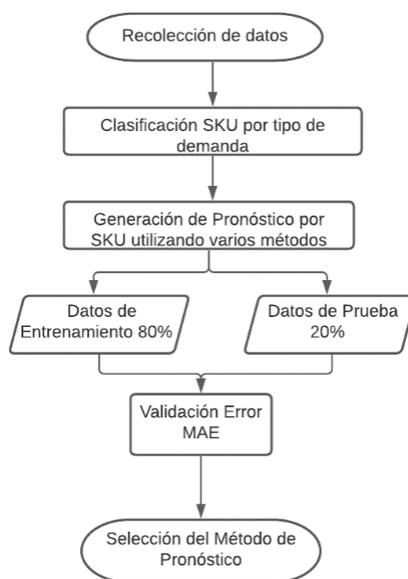


Diagrama 8 Desarrollo del Pronóstico: Grupo A Multicriterio. Fuente: Elaboración Propia

Para el desarrollo de los pronósticos, se seleccionaron 100 referencias para cada uno de los patrones de demanda, a excepción del intermitente, ya que para este grupo no se encontró ítems clasificados dentro de las muestras escogidas (Tabla 34).

Tiempo de ejecución (100 referencias): 3.843649 minutos.

No.	Patrón	# SKU
1	Errático	100
2	Irregular	100
3	Estable	100
4	Intermitente	-
TOTAL		300

Tabla 34 Muestras SKU para Desarrollo de Pronóstico. Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se relaciona los resultados obtenidos, según el tipo de demanda y utilizando el error MAE para realizar la comparación y selección del modelo de previsión:

- **Errático:** De las líneas simuladas, el método de Redes Neuronales arrojó los menores errores (68%), seguido de los métodos ETS (14%) y Croston (13%) (Tabla 35).

Método de Pronóstico: Grupo Errático	Líneas	%
ETS	14	14%
Croston	13	13%
Winters	1	1%
Arima	4	4%
RN	68	68%
SUMA	100	100%

Tabla 35 Resultados Métodos de Pronóstico: Grupo Multicriterio A Errático. Fuente: Elaboración Propia

- **Estable:** El método de Redes Neuronales obtuvo una participación del 66% frente a los menores errores de pronóstico, seguido de los métodos ETS (10%), Croston (10%), Winters (11%) (Tabla 36).

Método de Pronóstico: Grupo Estable	Líneas	%
ETS	10	10%
Croston	10	10%
Winters	11	11%
Arima	3	3%
RN	66	66%
SUMA	100	100%

Tabla 36 Resultados Métodos de Pronóstico: Grupo Multicriterio A Estable. Fuente: Elaboración Propia

- **Irregular (Lumpy):** Para este grupo el método de Redes Neuronales obtuvo los menores errores (50%), seguido de los métodos ETS (12%), Croston (14%) y Winters (11%) (Tabla 37).

Método de Pronóstico: Grupo Irregular	Líneas	%
ETS	12	12%
Croston	14	14%
Winters	11	11%
Arima	13	13%
RN	50	50%
SUMA	100	100%

Tabla 37 Resultados Métodos de Pronóstico: Grupo Multicriterio A Irregular. Fuente: Elaboración Propia

Se encuentra que, para todos los patrones de demanda, la técnica de Redes Neuronales presentó los mejor desempeños. En la Tabla 38 se consolidó los datos de las 300 muestras para los menores errores de pronósticos: Redes Neuronales (61%), ETS (12%), Croston (12%), Winters (8%), ARIMA (7%); por lo anterior, para el grupo A multicriterio, se determinó utilizar el modelo de Redes Neuronales como método dominante de pronóstico.

Método de Pronóstico Grupo A	Líneas	%
ETS	36	12%
Croston	37	12%
Winters	23	8%
Arima	20	7%
RN	184	61%
SUMA	300	100%

Tabla 38 Consolidado Resultados Menores Errores MAE: Grupo Multicriterio A. Fuente: Elaboración Propia

Al revisar que método tuvo los mayores errores de pronóstico MAE, se encuentra que ARIMA, arrojó la mayor participación (59%), mientras que para los otros tres modelos (Croston, Redes Neuronales y Winters) el porcentaje fue similar (14% - 9%) (Tabla 39). Por lo anterior, se podría descartar el uso de este modelo de pronóstico para el desarrollo de la propuesta.

Método de Pronóstico Grupo A	Líneas	%
ETS	17	6%
Croston	26	9%
Winters	43	14%
Arima	178	59%
RN	36	12%
SUMA	300	100%

Tabla 39 Consolidado Resultados Mayores Errores MAE: Grupo Multicriterio A. Fuente: Elaboración Propia

En la etapa inicial del desarrollo del pronóstico, se realizaron simulaciones sin tener en cuenta la evaluación de datos de prueba, se encontró que, el método de Redes Neuronales tuvo una participación del 85% para los menores errores de pronósticos.

Al dividir la serie de tiempo, en datos de entrenamiento y pruebas, el método de Redes Neuronales paso de tener una participación del 85% al 61% para los menores errores de pronósticos (Tabla 38). Se concluye que el método de Redes Neuronales presentó una caída en su desempeño, es decir perdió capacidad de generalización, ante la aparición de datos nuevos en la serie de tiempo.

A continuación, se explicará en detalle la interpretación de los resultados obtenidos para el SKU 9094202049:

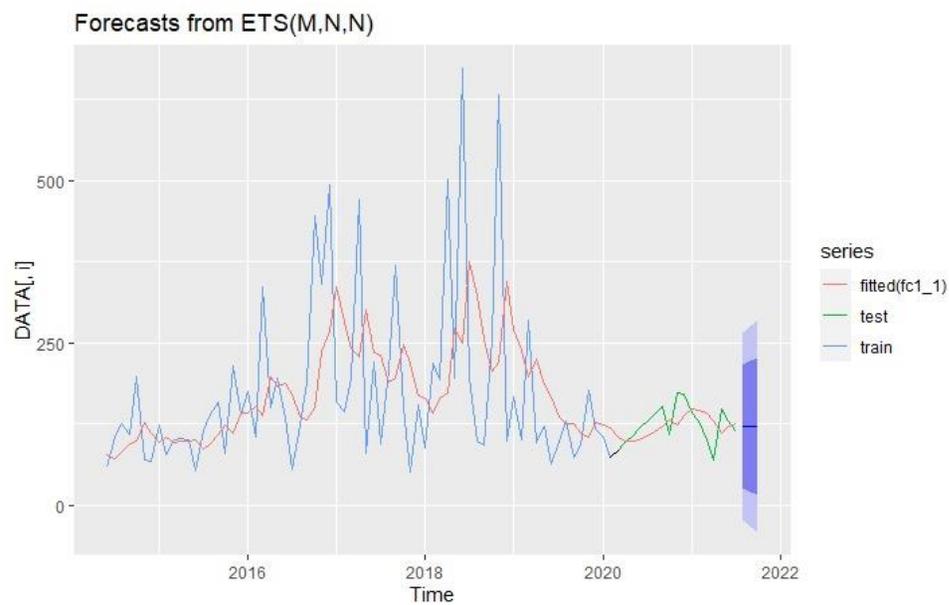
PN	9094202049	
Método:	ETS(M,N,N)	
x1	121.3	El programa arroja un modelo ETS(M,N,N), que hace referencia a un modelo con errores multiplicativos, sin tendencia y sin estacionalidad. Ver Gráfica 23
x2	121.3	
x3	121.3	
MAE	27.8	
Método:	Croston's method	
x1	145.67	Ver Gráfica 24
x2	145.67	
x3	145.67	
MAE	28.4	
Método:	Holt-Winters' additive method	
x1	95.4	Ver Gráfica 25
x2	127.3	
x3	147.5	
MAE	60.7	
Método:	ARIMA(1,0,2) with non-zero mean	
x1	140.4	Indica un modelo ARIMA(p,d,k)=(1,0,2), donde cada uno de los parámetros (p,d,k) indican el orden de las distintas componentes del modelo (autorregresivo, integrado y de media móvil). Ver Gráfica 26
x2	140.4	
x3	140.4	
MAE	156.1	
Método	NNAR(4,1,3)[12]	
x1	137.4	Los resultados nos relacionan un modelo de red neuronal del tipo NNAR(4,1,3) _[12] . El anterior nos indica un modelo de red neuronal con las siguientes entradas $y_t - 1$, $y_t - 2$, $y_t - 3$, $y_t - 4$, $y_t - 12$ (p=4), con datos estacionales (1 estación con 12 meses por estación) (P=1) y 3 neuronas en su capa oculta (k=3). Ver Gráfica 27
x2	136.9	
x3	136.8	
MAE	41.8	

Tabla 40 Resultados Generales Pronóstico PN 9094202049. Fuente: Elaboración Propia

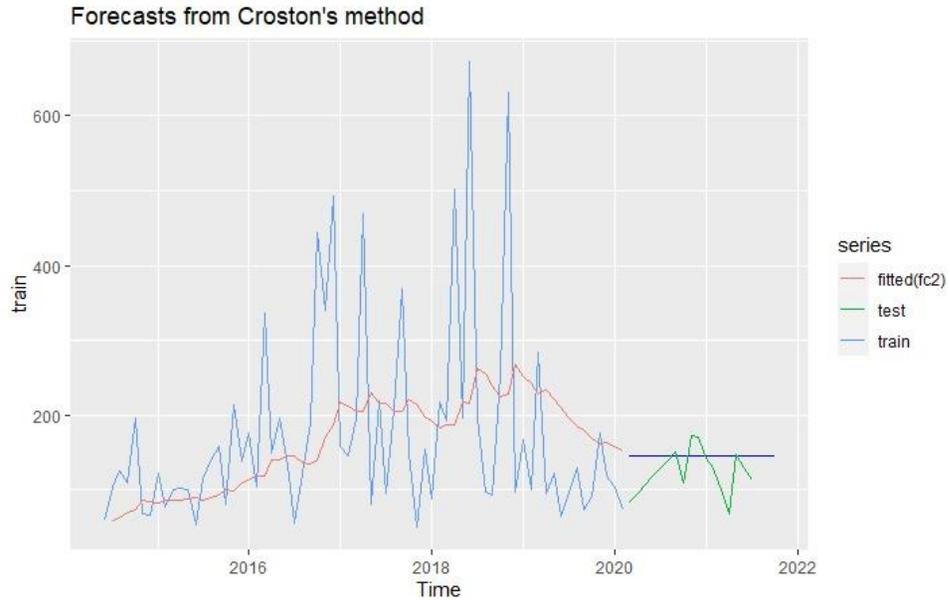
Con los diferentes modelos de previsión de la demanda evaluados, se encuentra que para el SKU 9094202049, el modelo de ETS del tipo (M,N,N) obtuvo los menores errores de pronóstico MAE=27.8 unidades. En la Tabla 40 se aprecia los valores calculados por el software R-Studio, indicando el tipo del modelo del pronóstico, valores de predicción (x₁,x₂,x₃), errores (MAE) y las respectivas gráficas de las series de tiempo.

Para las referencias pronosticadas, se obtuvieron las gráficas de las series de tiempo para los ítems evaluados (Gráfica 23 – Gráfica 27). Se aclara las siguientes convenciones para las gráficas obtenidas:

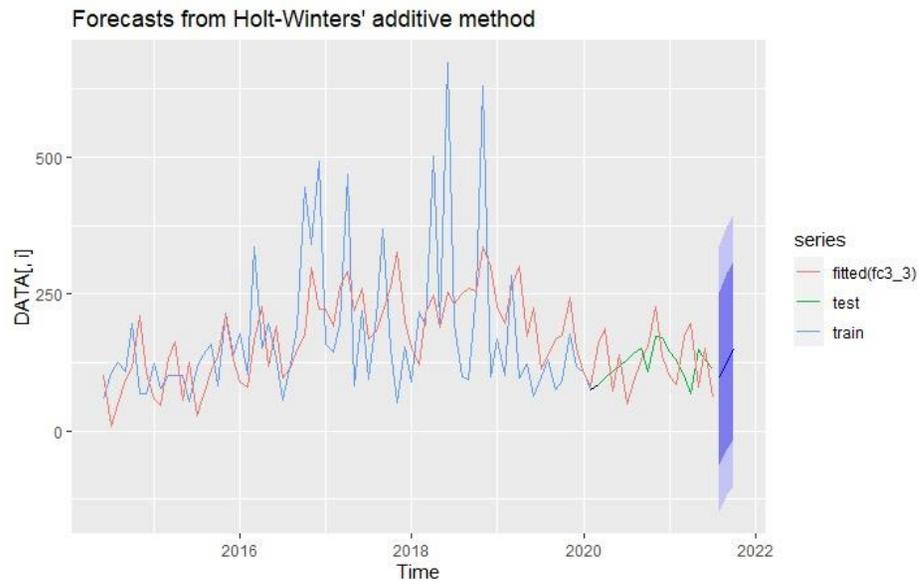
- Fitted (color rojo): representan los valores ajustados según el método de pronóstico evaluado.
- Test (color verde): valores para la evaluación de los datos de prueba.
- Train (color azul claro): valores utilizados para la evaluación de los datos de entrenamiento.
- Color azul fuerte: valores pronosticados para este caso 3 meses (x_1, x_2, x_3).



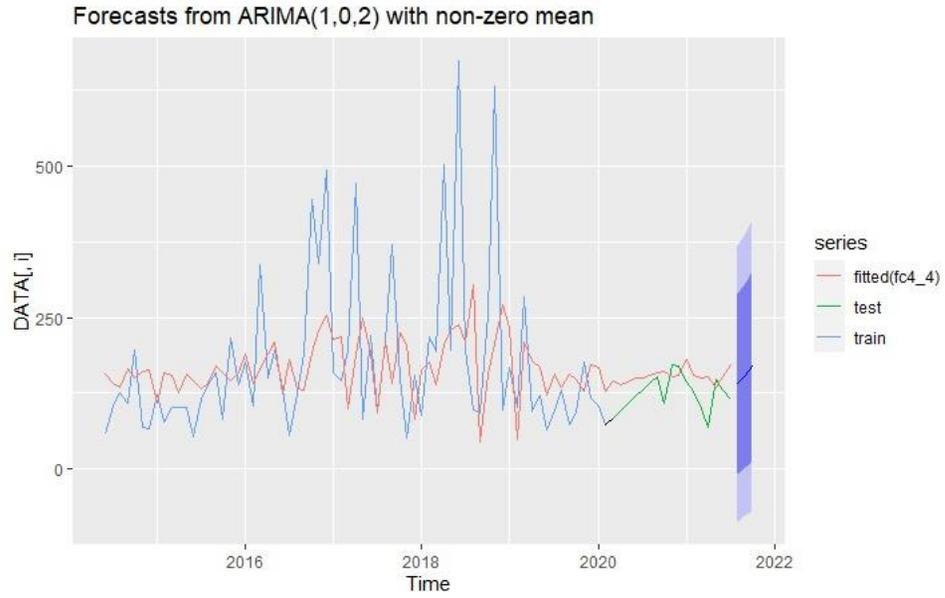
Gráfica 23 Modelo Pronóstico ETS: PN 9094202049. Fuente: Elaboración Propia



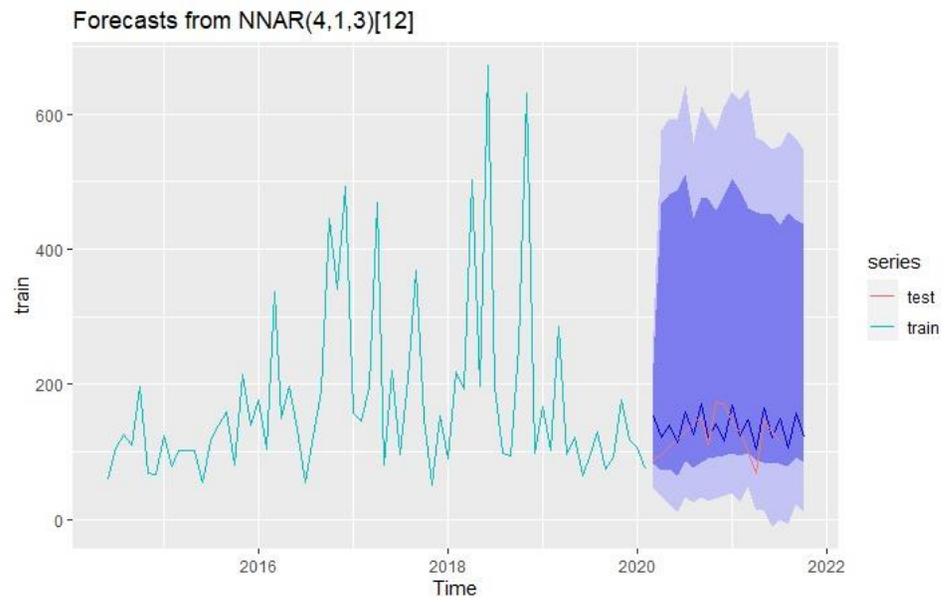
Gráfica 24 Modelo Pronóstico Croston: PN 9094202049. Fuente: Elaboración Propia



Gráfica 25 Modelo Pronóstico Holt Winters: PN 9094202049. Fuente: Elaboración Propia



Gráfica 26 Modelo Pronóstico ARIMA: PN 9094202049. Fuente: Elaboración Propia



Gráfica 27 Modelo Pronóstico RN: PN 9094202049. Fuente: Elaboración Propia

8.2.2 Pronósticos Categoría B Multicriterio

Tiempo de ejecución (100 ítem): 1.742706 minutos.

En el Grupo B se propone una técnica de pronóstico no tan compleja como la aplicable en el grupo A . Para este grupo se escogerá 100 productos y por medio del programa R-Studio se utilizó el modelo de serie temporal suavización exponencial (ETS). Este método de suavización exponencial es uno de los principales métodos clásicos de previsión cuantitativa, siendo una técnica sencilla, robusta y ampliamente utilizada para la previsión de la demanda (Billah, King, Snyder, & Koehler, 2006).

R-Studio arrojó los siguientes resultados: modelo ETS generado, error MAE y los valores futuros (x_1, x_2, x_3) (Tabla 41).

#	PN	Descripción	Línea	MAD	Saldo	Modelo	MAE	x1	x2	x3
1	9098208286	FUSIBLE	ELECTRICIDAD	3.67	10	ETS(A,M,N)	1.20	2.69	2.73	2.76
2	9046705063C0	BROCHE FIJACION	GENERAL-MIXTURA	4.17	37	ETS(A,A,N)	3.00	8.05	8.64	9.23
3	90311T0035	SELLO ACEITE DIFE DR	GENERAL-MIXTURA	3.33	24	ETS(A,Ad,N)	4.10	7.81	7.81	7.81
4	9031148031	SELLO ACEITE DISTRIB	GENERAL-MIXTURA	4.33	12	ETS(M,Ad,N)	2.20	4.43	4.43	4.43
5	7422360030E0	CUBIERTA APOYACODODR	CARROCERIA	2.5	1	ETS(A,N,N)	3.00	4.09	4.09	4.09
6	689650K020	PSADOR PORTON TRASER	CARROCERIA	2.33	1	ETS(A,A,N)	0.90	2.09	2.13	2.17
7	746160K010B0	TAPON EMPUÑADURA DR	CARROCERIA	2.5	20	ETS(A,A,N)	2.20	7.66	7.71	7.76
8	9091915533	CABLE RESI BUJIA N4	ELECTRICIDAD	4.5	8	ETS(A,N,N)	1.20	2.25	2.25	2.25
9	90389T0005	BUJE RESORTE SUSPENSION	GENERAL-MIXTURA	4.5	23	ETS(A,N,N)	7.40	9.92	9.92	9.92
10	4430522061	TAPA REV BOM ACEITE	TREN POTENCIA	2.33	10	ETS(A,N,N)	2.30	6.19	6.19	6.19

Tabla 41 Resultados Pronósticos ETS: Grupo Multicriterio B. Fuente: Elaboración Propia

El código implementado nos indica para el método ETS, el modelo de pronóstico asociado para cada ítem evaluado:

- 9098208286: ETS(A,M,N): Modelo con errores aditivos, tendencia multiplicativa y sin estacionalidad.
- 9031148031: ETS(M,Ad,N): Modelo con errores multiplicativos, tendencia aditiva suavizada y estacionalidad nula.

8.2.3 Pronósticos Categoría C Multicriterio

Teniendo en cuenta que el grupo C tiene el mayor número de referencias (8,579 ítems) y que sólo genera el 7.7% de las ventas de repuestos, no se justifica por temas de costos y tiempos computacionales abordar métodos complejos. Se definió el método de Promedio Móvil Simple, con un k equivalente a 6 meses de observaciones. A partir de un cálculo en Excel, se obtuvieron los valores futuros (x_1, x_2, x_3) y el error MAE.

#	PN	Descripción	Saldo	MAD	MAE	2021			
						Julio	X+1	X+2	X+3
1	9031162007	RETEN ACEITE EJE TR.	50	5.17	9	5	7	8	9
2	9017914068	TUERCA	8	4	4	2	6	5	4
3	9031158011	SELLO ACEITE	12	4.33	2	-	1	1	1
4	8942235010	SENSOR TEMPERAT EFI	4	5.33	2	5	6	6	5
5	091140K030	VARILLA GATO	5	7.17	4	10	6	5	5
6	9046707164	BROCHE FIJACION	87	7	18	8	22	22	21
7	4825226070	RECUBRIMIENTO HOJA	81	7	11	16	9	8	9
8	9010516053	PERNO BRAZO SUSP D I	6	3.17	2	2	3	2	2
9	8907035210	LLAVE APERTURA PUERTAS	8	3	1	-	2	2	2
10	9015960478	TORNILLO P	6	5.5	5	9	7	7	9

Tabla 42 Resultados Promedio Móvil Simple: Grupo Multicriterio C. Fuente: Elaboración Propia

9 Propuesta: Modelo de Revisión Periódica (R,S)

En el estudio de sistemas de reposición de inventario, se determinó que el modelo de revisión periódica (R,S), es el que mayor se ajusta a la compañía, relacionando la política de inventario Max-Max (reponer el inventario en una cantidad necesaria para alcanzar un punto máximo de inventario) y revisión fija en los análisis de los pedidos.

El modelo de revisión periódica (R,S) tiene aspectos interesantes en comparación con el actual sistema de reposición, ya que incluye parámetros adicionales tales como: factores de seguridad asociados a una tasa de servicio, desviación estándar de la demanda durante los tiempos de revisión de pedidos y lead time y aplicación de modelos de pronósticos.

Al determinar el factor de seguridad, basado en los objetivos de la tasa de servicio, se obtiene inventarios de seguridad distintos para cada grupo de clasificación. En la actualidad todos los ítems manejan el mismo factor de seguridad, sin importar el grupo de inventario o tasa de servicio objetivo. Al tener esta diferenciación de los factores de seguridad, habría una disminución en los valores del inventario; lo anterior reduciría los costos de almacenamiento y mantenimiento, y por ende aumentaría la rentabilidad de la organización.

En el planteamiento de la propuesta y desarrollo de los cálculos, se definen las siguientes variables:

- **Tiempo de Reposición:** La empresa define periodos fijos para la revisión de pedidos, estos se realizan con una frecuencia diaria, por lo tanto, $R=1$ día.
- **Lead time:** La empresa no cuenta con un sistema de cálculo de lead time promedio por cada ítem, se estima un lead time de $L=60$ días promedios para todas las referencias equivalente a su transporte marítimo.
- **Niveles de Tasa de Servicio (SR Tipo P1):** Para el modelo (R,S) se definió utilizar una tasa de servicio tipo P1, donde cada grupo multicriterio, tiene asociado un valor objetivo (Tabla 43). Se sugiere a la administración, realizar estudios posteriores para optimizar la tasa de servicio y costos asociados al inventario de seguridad.

Tasa de Servicio P1 (%)	
SR A (%)	99%
SR B (%)	95%
SR C (%)	80%

Tabla 43 Tasa de Servicio Objetivo P1. Fuente: Elaboración Propia

Una vez definido los objetivos de la tasa de servicio P1, se asume una distribución normal, para determinar el factor de seguridad (k) en cada grupo de clasificación. Silver et al. (1998) indicaron que la distribución normal, es sin duda la distribución de probabilidad más importante en la decisión de la planificación de la producción y la gestión de inventarios, ya que es un buen modelo para representar la demanda.

Una vez definido los parámetros del modelo (R,S), se desarrolló el siguiente ejemplo para calcular el stock de seguridad, máximo punto de inventario y la cantidad de ordenamiento a partir de los siguientes datos:

- Referencia: 178010L040 (Filtro de Aire de Motor)

Parámetros	Descripción	Valor
Grupo	Clasificación Multicriterio	A
Tasa de Servicio (%)	Tipo P1	99%
R (días)	Frecuencia de revisión:	1
LT (días)	Tiempo de Entrega:	60
OO (UN)	UN en Tránsito	2,040
OH (UN)	UN a la mano	1,510
BO (UN)	Back-orders	0
MAD* (UN)	Promedio Ventas Seis Meses	1,947
MAE (UN)	Error Absoluto medio	56.71
x1 (UN)	Pronóstico Mes N+1	1,814
x2 (UN)	Pronóstico Mes N+2	1,880

Tabla 44 Parámetros para el cálculo del Modelo (R,S): PN: 178010L040. Fuente: Elaboración Propia

Se procede a realizar los siguientes cálculos:

- **Posición del Inventario (Inventario efectivo):**

$$P = OH + OO - BO = 3,550 \text{ UN}$$

Ecuación 29 Cálculo posición del Inventario: Modelo (R,S)

- **Desviación estándar de la demanda durante el periodo de revisión y el tiempo de entrega (R+L):** En el cálculo se utilizó el error MAE obtenido en el proceso de pronósticos, con el fin de calcular la desviación estándar de la demanda.

$$\sigma_{D(R+L)} = \sqrt{R+L} \cdot 1.25 \cdot MAE = \sqrt{\frac{1}{30} + \frac{60}{30}} \cdot 1.25 \cdot 56.71 = 101 \text{ UN}$$

Ecuación 30 Cálculo desviación estándar para los tiempos R+L: Modelo (R,S)

- **Stock de Seguridad:** Para determinar el valor de k, se utilizó la función de Excel: DISTR.NORM.ESTAND.INV(Tasa de Servicio%).

$$SS = k \cdot \sigma_{D(R+L)} = 2.33 \cdot 101 = 236 \text{ Unidades}$$

Ecuación 31 Cálculo Stock de Seguridad: Modelo (R,S)

- **Nivel Máximo de Inventario:** Para el cálculo se utilizó la demanda pronosticada durante el tiempo del lead time.

$$MIP = D_d(L + R) + SS = ((x_1 + x_2) \cdot (1 + R)) + SS = \left((1,814 + 1,880) \cdot \left(1 + \frac{1}{30} \right) \right) + 236 = 4,055 \text{ UN}$$

Ecuación 32 Cálculo MIP Punto Máximo de inventario: Modelo (R,S)

Al calcular el MIP con el actual factor de seguridad se obtiene el siguiente valor:

$$MIP \text{ Actual} = MAD \cdot (5.05) = 1,947 \cdot (5.05) = 9,833 \text{ UN}$$

Ecuación 33 Cálculo MIP Actual: PN 178010L040

Comparando los dos valores del punto máximo de inventario, se encuentra una diferencia de 5,778 UN, lo conlleva un exceso de inventario e incremento de costos y espacios de almacenamiento en el modelo actual.

- **Cantidad Sugerida de Pedido:**

$$Q_1 = MIP - P = 4,055 - 3,550 = 505 \text{ UN}$$

Ecuación 34 Cálculo Cantidad sugerida: Modelo (R,S)

Para este caso, el modelo (R,S) nos indica a solicitar $Q_1 = 505 \text{ Unidades}$, para el primer periodo de revisión; con este valor Q_1 , se llega al punto máximo de inventario.

Una vez explicado la metodología del modelo de revisión periódica (R,S), es necesario destacar, que la cantidad de unidades para el punto máximo de inventario (MIP), es menor para el modelo (R,S). El valor del MIP actual se calcula teniendo en cuenta un factor de seguridad, cuyo valor equivale a la sumatoria del Ciclo de Pedido (OC)+ Stock de Seguridad (SS) + Stock de Seguridad por lead time (SS LT).

En este modelo de inventario, todos los ítems de la clasificación tienen el mismo factor sin importar el grupo de clasificación o de los objetivos de la tasa de servicio. Al realizar la comparación con el

modelo (R,S), el MIP se calcula a partir de varios parámetros: demanda pronosticada (x_1, x_2, x_3), errores de pronóstico MAE, tiempo de revisión de pedido (R), lead time (L) y un factor de seguridad (k) basado en la tasa de servicio (P1).

En la Tabla 45 se resume las dos formulaciones para el cálculo del MIP, el cual es útil para determinar las diferencias entre los dos modelos. Realizado las simplificaciones para el punto máximo de inventario, se evidencia que el MIP actual maneja un factor de seguridad de (5.05), cuyo valor supera el factor del cálculo del modelo (R,S) (2.05 meses + SS basado en los errores de pronóstico y tasa de servicio P1).

MIP Actual: SOQ	Propuesta MIP: Modelo (R,S)
<p style="text-align: center;">$MIP = MAD^* \cdot (SS LT + SS + OC)$</p> <p>Se realiza la siguiente aproximación: $MIP = MAD^* \cdot (5.05 \text{ meses})$</p> <p>Donde:</p> <p style="text-align: center;">$SS = 2.5 \text{ meses}$ $SS LT = 2.5 \text{ meses}$ $OC = \frac{1}{20 \text{ días hábiles}} = 0.05 \text{ meses}$ $MAD^* = \text{Promedio ventas 6 meses}$</p>	<p style="text-align: center;">$MIP = D_d(L + R) + SS$</p> <p>Se realiza la siguiente aproximación: $MIP = D_d \cdot (2 + \frac{1}{20}) + k \cdot 1.25 \cdot MAE \cdot \sqrt{R + L}$</p> <p style="text-align: center;">$MIP = D_d \cdot (2.05 \text{ meses}) + 4.2 \cdot MAE$</p> <p>Donde: $L = 60 \text{ días} = 2 \text{ meses}$ $R = \frac{1}{20 \text{ días hábiles}} = 0.05 \text{ m}$ $D_d = \text{Demanda Pronosticada (UN)}$ $MAE = \text{Error Pronóstico (UN)}$ $SS = k \cdot 1.25 \cdot MAE \cdot \sqrt{R + L} \text{ (UN)}$ Tomando $k = 2.33$ (Tasa Servicio P1: 99%)</p>

Tabla 45 Comparación Calculo MIP Actual vs Modelo (R,S). Fuente: Elaboración Propia

Para evaluar las diferencias de los puntos máximos de inventario entre el modelo actual y el modelo (R,S), se seleccionaron 30 ítems de los 3 grupos de clasificación multicriterio (Tabla 46).

Se encuentra que bajo el modelo (R,S) se redujeron, los puntos máximos de inventarios, lo anterior, traduce en una disminución del costo del inventario y de almacenamiento/mantenimiento. Para los productos analizados, se presentó una disminución promedio de -42% en las unidades del MIP; lo anterior, es generado principalmente por el alto factor de seguridad del modelo actual.

#	PN	Grupo Multicriterio	MAD* (UN)	MIP Actual (UN)	MIP (R,S) (UN)	Diferencia MIP (R,S) - MIP Actual (UN)	Diferencia MIP (%)
1	178010L040	A	1,883	8,002	4,007	↓ - 3,995	↓ -50%
2	8713952040	A	1,078	5,444	2,584	↓ - 2,860	↓ -53%
3	9043024003	A	856	4,324	2,072	↓ - 2,252	↓ -52%
4	871390K080	A	782	3,950	1,760	↓ - 2,190	↓ -55%
5	233900L070	A	727	3,672	1,577	↓ - 2,095	↓ -57%
6	2339036760	A	535	2,700	1,302	↓ - 1,398	↓ -52%
7	044650K401	A	231	1,165	897	↓ - 268	↓ -23%
8	8521453080	A	178	899	470	↓ - 429	↓ -48%
9	9043012031	A	12,505	63,151	27,957	↓ - 35,194	↓ -56%
10	043710K082	A	8	39	25	↓ - 14	↓ -35%
11	9050720016	B	13	66	35	↓ - 31	↓ -46%
12	5211535153	B	15	75	51	↓ - 24	↓ -31%
13	4351260210	B	12	59	31	↓ - 28	↓ -47%
14	5611750140	B	10	51	16	↓ - 35	↓ -69%
15	9021306013	B	16	79	47	↓ - 32	↓ -41%
16	9011914071	B	10	52	37	↓ - 15	↓ -28%
17	9018906006	B	11	56	16	↓ - 40	↓ -72%
18	9098115020	B	4.8	25	18	↓ - 7	↓ -28%
19	9091603117	B	10	48	19	↓ - 29	↓ -60%
20	9094702H01	B	4	18	17	↓ - 1	↓ -7%
21	9031162007	C	6	30	29	↓ - 1	↓ -3%
22	9017914068	C	6	29	17	↓ - 12	↓ -40%
23	9031158011	C	2	8	5	↓ - 3	↓ -37%
24	8942235010	C	6	28	15	↓ - 13	↓ -45%
25	091140K030	C	6	32	17	↓ - 15	↓ -46%
26	9046707164	C	25	127	71	↓ - 56	↓ -44%
27	4825226070	C	9	43	34	↓ - 9	↓ -21%
28	9010516053	C	3	13	8	↓ - 5	↓ -37%
29	8907035210	C	2	12	6	↓ - 6	↓ -53%
30	9015960478	C	5	27	22	↓ - 5	↓ -19%
						PROMEDIO	↓ -42%

Tabla 46 Comparación MIP Actual vs Modelo (R,S). Fuente: Elaboración Propia

Para evaluar las mejoras del sistema de suministro, entre el modelo (R,S) y del sistema actual (SOQ), se utilizó el concepto de Costo Total Relevante (CTR). Vidal (2010) relaciona el CTR, como la función objetivo a minimizar en el estudio de modelos de abastecimiento.

$$CTR(\$/año) = \text{Costo de Ordenamiento } (\$/orden) + \text{Costo de Mantenimiento } (\$/año) \\ + \text{Costo de Faltantes } (\$)$$

Ecuación 35 Costo Total Relevante CTR

En la revisión del modelo (R,S), se encuentra que los costos de ordenar permanecerían iguales, ya que se asume que no hay descuentos y que, se seguiría ordenando con la misma frecuencia, esto basado en la política de la compañía sobre el ordenamiento diario a fábrica.

El costo de sostener, relacionado con el mantenimiento del inventario, se reduciría basado en la disminución promedio del -42% para los puntos máximos de inventario (Tabla 42), lo anterior manteniendo los niveles de servicio objetivos.

El costo de faltantes sería relativamente bajo, teniendo en cuenta, por ejemplo, el 99% del nivel de servicio asignado para el grupo A multicriterio.

Cómo conclusión al tener puntos máximos de inventario, muy por encima de lo requerido, esto generaría sobre stock para algunos ítems y un aumento en el valor del inventario. Dentro de la clasificación multicriterio del grupo A, esta categoría presentó los mayores costo del inventario (60% del costo total), lo que, para futuros trabajos, se sugiere revisar y tener un enfoque para este grupo principal. Se aconseja a la administración realizar ejercicios de simulaciones y optimizaciones para evaluar los niveles de servicio y los costos del inventario, con el fin de obtener funciones que minimicen su valor.

10 Conclusiones

1. El modelo de clasificación multicriterio ABC propuesto, utilizó variables cuantitativas y cualitativas relevantes a la gestión de inventarios, para identificar los artículos que tienen el mayor impacto para las ventas de la compañía. La categoría A, la cual quedó conformada por 3,431 referencias (que representa el 60% del costo del inventario, el 78% de las ventas y 65% del total de unidades en backorder), presentó los mayores problemas de disponibilidad. Se destaca que la no disponibilidad de partes de este grupo generó la no facturación, durante el mismo periodo, de un valor cercano al 4% de las ventas totales de repuestos. La identificación de los ítems de la categoría A, permitirá a la organización enfocar correctamente sus esfuerzos, ya que, por el alto número de líneas, resultaría ineficiente en realizar un control detallado de todos los grupos del inventario.

2. La metodología aplicada en la generación de la clasificación multicriterio, abarco el Principio de Pareto y el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), los cuales fueron una herramienta importante para resolver el problema de la participación porcentual de cada criterio y la definición de los cortes de los grupos de inventario. Se recalca que el modelo actual no cuenta con cortes óptimos en la clasificación, además de basarse en un solo criterio para la parametrización del inventario. Al tener una parametrización no adecuada, se podrían tener asignadas políticas incorrectas para ciertos ítems del inventario.

3. En el diseño del modelo de gestión de inventarios, se propone el uso de pronósticos en el proceso de abastecimiento. En el modelo actual de reposición, el sugerido no tiene en cuenta características propias de las series de tiempo, tales como: estacionalidades, tendencias y variabilidades. En el estudio de técnicas de pronósticos asociadas a las categorías del inventario y patrones de demanda, se determinó que, para el grupo A multicriterio, el método de Redes Neuronales arrojó los menores errores de pronósticos (MAE). Por temas de tiempos de ejecución de los modelos y el alto número de ítems, se definió utilizar la técnica ETS para la categoría B y el promedio móvil simple para el grupo C.

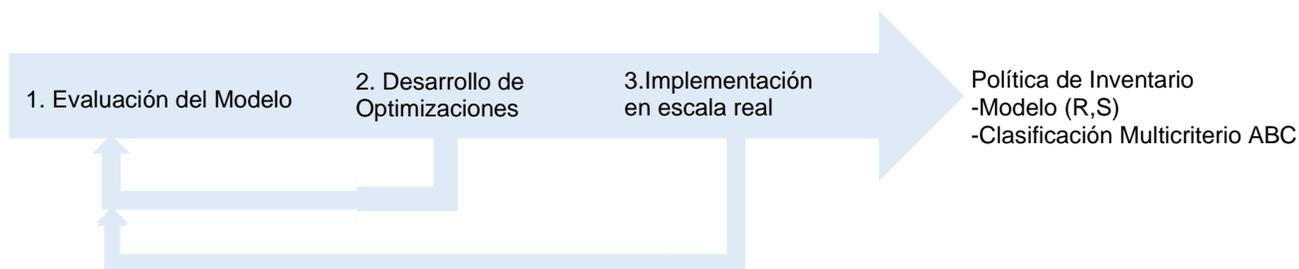
4. En el estudio de modelos de reposición de inventario, se propone la aplicación del modelo de revisión periódica (R,S), cuya formulación es aplicable a la organización, ya que involucra políticas de inventario tipo max-max y a la revisión fija de los pedidos. Esta propuesta es interesante, ya que, adopta para el cálculo del factor de seguridad y puntos máximos de inventarios, parámetros adicionales tales como: nivel de servicio P1, desviación de la demanda durante los tiempos (R+L) y el uso de herramientas para la previsión de la demanda. Bajo este sistema de ordenamiento, cada ítem tendría un factor de seguridad distinto, lo que genera una diferenciación frente a la política actual, en donde todos los ítems, independiente de la clasificación o del nivel de servicio objetivo, tienen el mismo factor de seguridad.

5. Para el modelo de revisión periódica (R,S), se encuentra que la cantidades de los puntos máximos de inventarios son menores frente al modelo actual, esto en un 42% promedio para los ítems analizados. Lo anterior se debe a que el factor de seguridad actual, 5.05 meses, es mucho mayor que el modelo (R,S), el cual es de 2.05 meses + SS basado en los errores de pronóstico y tasa de servicio P1. Al tener menores puntos máximos de inventarios, se generaría una disminución en los costos de inventario y almacenamiento, y por ende aumentaría la rentabilidad de la empresa.

Recomendaciones:

Para continuar con el desarrollo de un plan de implementación, para la propuesta de Clasificación Multicriterio ABC y del sistema de ordenamiento de pedidos basado en el Modelo (R,S), se sugiere lo siguiente:

Iniciar un plan de implementación a partir de 3 etapas, lo anterior partiendo del diseño de esta investigación, y obteniendo como resultado final una nueva política de gestión de inventario para la compañía:



Gráfica 28 Implementación para la definición de la nueva política de inventario. Fuente: Elaboración Propia

1) **Evaluación del Modelo:** Se propone reevaluar el modelo planteado en este documento, esta vez teniendo en cuenta un mayor rango de productos del inventario (totalidad de ítems de la clasificación de inventario vivo 11,100 SKU), además del uso de los datos de la demanda y no de las ventas para desarrollar diferentes simulaciones/pronósticos.

Teniendo en cuenta el alto valor del inventario (25,000-30,000 millones de pesos COP) se considera estrictamente necesario, mediante el uso de simulaciones, pruebas y mediciones de indicadores, disminuir la incertidumbre frente al riesgo del patrimonio de la organización ante una posible implementación a escala real. Mediante el uso de simulaciones computacionales, que representarían la operación actual (evaluada a 6 meses) y solicitando los pedidos a fábrica bajo los parámetros definidos del modelo (R,S); se deberá realizar una medición constante de los indicadores: meses de inventario, costo del inventario por grupo, tasa de servicio, ventas y faltantes, para compararlos con el modelo actual y realizar algunos ajustes. Se considera que esta etapa de evaluación es fundamental, para demostrar que el modelo (R,S) es una mejor alternativa frente al modelo actual, sin colocar el riesgo el capital de la empresa.

2) **Desarrollo de Optimizaciones:** Una vez se haya evaluado la propuesta, basada en simulaciones, y realizando los ajustes necesarios frente al documento, se considera necesario iniciar un proceso de optimización de los modelos de Clasificación Multicriterio y Modelo (R,S). Por medio de la definición de diferentes funciones objetivos, se podría minimizar y ajustar los parámetros de entrada que tiene el sistema (ejemplo: cortes de los grupos de inventario, participación % de criterios, niveles de tasa de servicio, entre otros). Un claro ejemplo de funciones que podrían entrar a optimizar, son los valores de los objetivos de la tasa de servicio versus el costo del inventario o los cortes de la clasificación ABC y la relación de líneas/costos por cada grupo. Dichas propuestas de optimizaciones deben tener en cuenta las políticas de la compañía, ya que de lo contrario algunas no se podrían aplicar a la organización.

3) **Implementación Escala Real:** Una vez el diseño de gestión de inventarios haya sido evaluado y optimizada, se iniciaría la implementación a escala real con unas muestras representativas del inventario. Nuevamente sería necesario realizar mediciones, evaluaciones y posibles optimizaciones, esto teniendo en cuenta que se estaría utilizando datos de la demanda real y no simulaciones, ajustando los parámetros en caso de ser necesarios.

11 Anexos

11.1 Código de Programación Pronóstico: R-Studio

```
library(forecast)
library(ggplot2)
library(readxl)
library(writexl)
library(imputeTS)

old <- Sys.time()
DATA <- read_excel("C:/Users/*****.xlsx")
DATA <- ts(DATA,frequency =12,start = c(2014, 6))
DATA <- na_interpolation(DATA)
ns <- ncol(DATA)
total <- length(DATA)/ns
l_train <- round(total*0.8)
l_test <- total-l_train
ítems <- colnames(DATA)

fcast <- matrix(NA,nrow=28,ncol=ns+1)

fcast[1:28, 1] <- c("item", "ETS", "x1", "x2", "x3", "MAE", "Croston","x1","x2", "x3", "D", "P", "MAE", "Winters",
"x1", "x2", "x3", "MAE", "ARIMA", "x1", "x2", "x3", "MAE", "RN", "x1", "x2", "x3", "MAE")

for(i in 1:ns)
{
  train <- head(DATA[,i], l_train)
  test <- tail(DATA[,i], l_test)
  fc1 <- forecast(train,h=(length(test)+3), allow.multiplicative.trend=TRUE)
  fc1_1 <- forecast(DATA[,i],h=3, allow.multiplicative.trend=TRUE)
  fcast[1,i+1] <- ítems[i]
```

```

fcast[2,i+1] <- fc1$method
fcast[3:5,i+1] <- fc1_1$mean
fcast[6,i+1] <- accuracy(fc1, test)[2,3]

fc2 <- croston(train, h=(length(test)+3))
fcast[7,i+1] <- fc2$method
fcast[8:10,i+1] <- tail(fc2$mean,3)
if(tail(fc2$mean,1)>0){
  fcast[11,i+1] <- fc2$model$demand$mean[1]
  fcast[12,i+1] <- fc2$model$period$mean[1]
} else {
  fcast[11,i+1] <- 0
  fcast[12,i+1] <- 0
}
fcast[13,i+1] <- accuracy(fc2, test)[2,3]

fc3 <- hw(train,h=(length(test)+3))
fc3_3 <- hw(DATA[,i], h=3)
fcast[14,i+1] <- fc3$method
fcast[15:17,i+1] <-fc3_3$mean
fcast[18,i+1] <- accuracy(fc3, test)[2,3]

fc4 <- auto.ARIMA(train)
fc4_4 <- auto.ARIMA(DATA[,i])
fcast[19,i+1] <- as.character(fc4)
f <- forecast(fc4_4, h=1)
fcast[20:22,i+1] <- f$mean
fcast[23, i+1] <- accuracy(forecast(fc5, h=length(test)), test)[2,3]

```

```
fc5<- nnetar(train)
fc5 <- forecast(fc5, h=(length(test)+3))
fcast[24, i+1] <- fc5$method
fcast[25:27,i+1] <- tail(forecast(fc5, h=(length(test)+3))$mean,3)
fcast[28,i+1] <- accuracy(forecast(fc5, h=3), test)[2,3]

}
fcast_df <- as.data.frame(fcast)
write_xlsx(fcast_df,"C:/Users***.xlsx", col_names =FALSE )
new <- Sys.time() - old
print(new)
```

12 Referencias Bibliográficas

- Amirkolaii, K., Aboli, A., Shazad, M., & Tonadre, R. (2017). *Demand Forecasting for Irregular Demands in Business Aircraft Spare Parts Supply Chains by using Artificial Intelligence (AI)*. International Federation of Automatic Control.
- ANDEMOS. (2020). *Andemos: Asociación Nacional de Movilidad Sostenible*. Obtenido de <http://www.andemos.org>
- Armstrong, J. (2001). *A Handbook for Researchers and Practitioners*. Estados Unidos: International Series in Operations Research & Management Science .
- Bacchetti, A., & Saccani, N. (2011). *Spare parts classification and demand forecasting for stock control: Investigating the gap between research and practice*. Italia: Omega.
- Billah, B., King, M., Snyder, R., & Koehler, A. (2006). *Exponential smoothing model selection for forecasting*. International Journal of Forecasting.
- Bischak, D., Robb, D., Silver, E., & Blackburn, J. (2014). *Analysis and Management of Periodic Review, Order-Up-To Level Inventory Systems with Order Crossover*. Canada, China, USA: Production and Operations Management.
- Boone, C., Craighead, C., & Hanna, J. (2008). Critical challenges of inventory management in service parts supply: A Delphi study. *Springer Science*.
- Borovykh, A., Oosterlee, C., & Bohté, S. (2019). *Generalization in fully-connected neural networks for time series forecasting*. Holanda: Journal of Computational Science.
- Bošnjaković, M. (2010). *Multicriteria Inventory Model for Spare Parts*. Technical Gazette.
- Boylan, J., & Syntetos, A. (2007). Forecasting for inventory management of service. *Complex System Maintenance Handbook*, 20.
- Boylan, J., & Syntetos, A. (2010). Spare Parts Management: A Review of forecasting research and Extensions. *IMA Journal of Management Mathematics*, 227-237.
- Burgaentzle, F. (2016). Pronósticos y modelos de inventarios en las industrias de alimentos: caso de estudio de una empresa láctea ecuatoriana. *Universidad San Francisco de Quito USFQ*.
- Callegaro, A. (2009). Forecasting Methods for Spare Parts Demand. Universita' Degli Studi Padova.
- Castro, C., Velez, M., & Castro, J. (2011). Clasificación ABC Multicriterio: Tipos Criterio y efectos en la asignación de pesos.
- Chambers, J., Mullick, S., & Smith, D. (1971). *How to Choose the right Forecasting Technique*. Estados Unidos: Harvard Business Review.

- Chase, R., & Jacobs, R. (2006). *Operations Management for Competitive Advantage*. New York: Mc Graw-Hill.
- Chase, R., Jacobs, R., & Aquilano, N. (2009). *Administración de Operaciones: Producción y Cadena de Suministro*. México: Mac Graw Hill.
- Chawla, G., & Miceli, V. (2019). Demand Forecasting and Inventory Management for Spare Parts. *MIT Center for Transportation & Logistics*.
- Chen, H., Peng, J., Zhou, Y., Li, L., & Pan, Z. (2014). *Extreme learning machine for ranking: Generalization analysis*. China: Neural Networks.
- Ching-Wu, C., Gin-Shuh, L., & Chien-Tseng, L. (2008). Controlling inventory by combining ABC analysis and fuzzy classification. *Computers & Industrial Engineering*.
- Cobo Betancourt, O. P. (2016). Diseño y formulación de un sistema de gestión de inventarios de materias primas en una compañía productora de absorbentes de higiene personal y cosméticos. *Repositorio Universidad Javeriana*.
- Cohen, M., & Ernst, R. (1988). Multi-item classification and generic inventory stock control policies. *Production and Inventory management Journal*.
- Collignon, J., & Vermorel, J. (Febrero de 2012). *Análisis ABC*. Obtenido de LOKAD Quantity Supply Chain: [https://www.lokad.com/es/definicion-analisis-abc-\(inventario\)](https://www.lokad.com/es/definicion-analisis-abc-(inventario))
- Cortés, C. G. (2017). Automobile spare-parts forecasting: A comparative study of time series methods. *UMP Publisher*.
- Croston, J. (1972). Forecasting and Stock Control for Intermittent Demands. *Palgrave Macmillan Journal*.
- DANE. (20 de Febrero de 2020). *Departamento Administrativo Nacional Estadística*. Obtenido de <https://www.dane.gov.co>
- Duchessi, P., Tayi, G. K., & Levy, J. (2015). A conceptual Approach for Managing of Spare Parts. *International Journal of Physical Distribution & Materials Management*.
- Ferreira, L. M., Maganha, I., Magalhaes, V., & Almeida, M. (2018). A Multicriteria Decision Framework for the Management of Maintenance Spares - A Case Study. *International Federation of Automatic Control*, 1-7.
- Flores, B., & Whybark, D. (1985). Multiple Criteria ABC Analysis. *Journal of Operations & Production Management*.
- Flores, B., & Whybark, D. (1987). Implementing Multiple Criteria ABC Analysis. *Journal of Operations Management*.
- FrePPLe.com. (s.f.). *FrePPLe.com*. Obtenido de <https://freppl.com/blog/demand-classification/>.

- Gaither, N., & Frazier, G. (2000). *Administración de producción y operaciones*. México: International Thomson.
- Gajpal, P., Ganesh, L., & Rajendranb, C. (1994). Criticality analysis of spare parts using the analytic hierarchy process. *Int. J. Production Economics* , 293-197.
- Gómez, I., & Brito, J. (2020). *Administración de Operaciones*. Guayaquil, Ecuador: Universidad Internacional del Ecuador.
- Guerra Valverde, Y. (2014). *Sistemas y Modelos de Inventarios*. Cuba: Yosvanys R. Guerra Valverde.
- Gutiérrez, E., Panteleeva, O., Hurtado, F., & González, C. (2013). *Aplicación de un modelo de inventario con revisión periódica para la fabricación de transformadores de distribución*. México: Ingeniería Investigación y Tecnología: UNAM.
- Güvenir, H., & Erel, E. (1998). Multicriteria inventory classification using a genetic algorithm. *European Journal of Operation Research*, 29-37.
- Hanke, J., & Wichern, D. (2010). *Pronóstico en los Negocios. Novena Edición*. México: Prentice Hall.
- Hu, Q., Boylan, J., Chen, H., & Labib, A. (2018). OR in spare parts management: A review. *European Journal of Operational Research*.
- Hua, Z., & Zhang, B. (2006). *A hybrid support vector machines and logistic regression approach for forecasting intermittent demand of spare parts*. China : Applied Mathematics and Computation.
- Hyndman, R., & Athanasopoulos, G. (2021). *Forecasting: Principles and Practice. 3rd ed.* Australia: Monash University.
- Jajimoggala, S. (2012). Spare parts criticality evaluation using hybrid multiple criteria decision making technique. *Information and Decision Sciences*.
- Kaabi, H., Jabeur, K., & Ladhari, T. (2018). A Genetic Algorithm Based Classification Approach for Multicriteria ABC Analysis. *International Journal of Information Technology&Decision Making*, 1-2.
- Kampen, T., Akkerman, R., & Van Donk, D. P. (2012). SKU classification: a literature . *International Journal of Operations & Production Management*.
- Kézdi, G., & Békés, G. (2021). *Data Analysis for Business, Economics, and Policy*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press .
- Krajewski, L., & Ritzman, L. (2000). *Administración de operaciones: Estrategia y Análisis*. México: Pearson Education.
- Krajewski, L., Ritzman, L., & Malhotra, M. (2008). *Administración de Operaciones: Procesos y cadenas de valor*. Estados Unidos: Pearson Education.

- Liu, L., & Wang, J. (2021). *Super multi-step wind speed forecasting system with training set extension and horizontal-vertical integration neural network*. China: Applied Energy.
- López, J. (2019). *Gestión de inventarios UF0476*. España: Editorial Elearning.
- Nahmias, S. (2007). *Análisis de la producción y las operaciones*. México: Mc Graw-Hill.
- Nakip, M. e. (2020). *Curse of Small Sample Size in Forecasting of the Active Cases in COVID-19 Outbreak*. ArXiv.
- Negrón, D. (2009). *Administración de operaciones. Enfoque de administración de procesos de negocios*. En D. M. Negron. DF Mexico: Cengage Learning.
- Pacheco Rodríguez, J. F. (2016). *Diseño de un modelo de gestión de inventarios tipo MRO para Ecopetrol SA. Escuela Internacional de Ciencias Económicas y Administrativas*.
- Parekh, S., Lee, J., & Kozman, T. (2008). *A Decision Support System for inventory Management*. USA: University of Louisiana at Lafayette.
- Pastor Quiste, J., & Javez Valladarez, S. (2007). *Modelo de inventario probabilístico con revisión periódica para mejorar la gestión del ciclo logístico de Lenmex Corporation S.A.C*. Perú: Scientia.
- Pedrero, V., Reynaldo, K., Ureta, J., & Cortez, E. (2020). *Generalidades del Machine Learning y su aplicación en la gestión sanitaria en Servicios de Urgencia*. Chile: Revista médica de Chile.
- Petrovic, D., & Petrovic, R. (1992). *Sparta II: Further development in an expert system for advising on stocks of spare parts*. *International Journal of Production Economics*.
- Puente, J., De la Fuente, D., Priore, P., & Pino, R. (2010). *ABC classification with uncertain data. a fuzzy model vs. a probabilistic model*. *Applied Artificial Intelligence: An International Journal*.
- Ramanathan, R. (2004). *ABC inventory classification with multiple-criteria using weighted linear optimization*. Oman: Operations Management and Business Statistics.
- Rego, J. R., & Mesquita, M. A. (2014). *Demand forecasting and inventory control: A simulation study on automotive spare parts*. Brasil: Int. J. Production Economics.
- Riaño, N. (16 de Febrero de 2021). *Estos son algunos de los efectos económicos que ha dejado el covid-19 en Colombia*. *Diario la República*.
- Roda, I., Macchi, M., & Fumagalli, L. (2014). *A review of multi-criteria classification of spare parts*. Valpara, Chile: Journal of Manufacturing Technology Management.
- Rodriguez, C. (24 de Mayo de 2019). *Las 10 empresas más grandes aportaron la mitad de los ingresos del sector vehículos*. Obtenido de Diario La República: www.larepublica.co

- Roldán, P. N. (25 de Abril de 2017). *Economipedia.com*. Obtenido de Haciendo fácil la economía: <https://economipedia.com/definiciones/cadena-de-suministro.html>
- Rpubs by R-Studio*. (s.f.). Obtenido de <https://rpubs.com/>
- R-Studio. (s.f.). *R-Studio*. Obtenido de <https://www.rstudio.com/>
- Saaty, T. L. (1997). *Toma de decisiones para líderes*. University of Pittsburgh.
- Sanders, N., & Manrodt, K. (2003). *The efficacy of using judgmental versus quantitative forecasting methods in practice*. Estados Unidos: The International Journal of Management Science.
- Santa Cruz, R., & Correa, C. (2017). Intermittent demand forecasting with time series methods and artificial neural networks: A case study. *Dyna*.
- Silver, E. (1981). Operations Research in Inventory Management: A Review and Critique. *Operations Research*, 628-645.
- Silver, E., & Robb, D. (2007). Some insights regarding the optimal reorder period in periodic review inventory systems. *International Journal of Production Economics*.
- Silver, E., Pyke, D., & Peterson, R. (1998). *Inventory Management and Production Planning and Scheduling. Third Edition*. Estados Unidos: Jhon Wiley & Sons.
- Silver, E., Pyke, D., & Peterson, R. (2001). *Inventory Management and Production Planning and Scheduling (Third Edition)*. Estados Unidos: Jhon Wiley & Sons.
- Stoll, J., Kopf, R., Schneider, J., & Lanza, G. (2015). *Criticality analysis of spare parts management: a multi-criteria classification regarding a cross-plant central warehouse strategy*. Alemania: German Academic Society for Production Engineering.
- Syntetos, A. (2001). Forecasting of Intermittent Demand.
- Syntetos, A., Boylan, J., & Croston, J. (2005). On the categorization of demand patterns. *Journal of the Operational Research Society*.
- Tao, Y., Lee, L. H., Chew, E. P., Sun, G., & Charles, V. (2017). *Inventory control policy for a periodic review system with expediting*. China, Singapur, Peru: Applied Mathematical Modelling.
- Teixeira, C., Lopes, I., & Figueiredo, M. (2017). *Multi-criteria classification for spare parts management: a case study*. Portugal: Procedia Manufacturing.
- Teunter, R., Babai, M., & Syntetos, A. (2010). ABC Classification: Service Levels and Inventory Costs. *Production and Operations Management Society*.
- Turrini, L., Meissner, J., & Pinçe, Ç. (2021). *Intermittent demand forecasting for spare parts: A Critical review*. Omega.

- Van Donselaar, K., & Broekmeulen, R. A. (2011). *Determination of safety stocks in a lost sales inventory system with periodic review, positive lead-time, lot-sizing and a target fill rate*. Países Bajos: International Journal of Production Economics.
- Velez, M., & Castro, C. (2002). *Modelo de revisión periódica para el control del inventario en artículos con demanda estacional: Una aproximación desde la simulación*. Medellín, Colombia: Dyna.
- Vidal, C. (2010). *Fundamentos de Control y Gestión de Inventarios*. Cali: Editorial Universidad del Valle.
- Villaverde, N. R. (7 de Junio de 2017). *R Pubs* . Obtenido de <https://rpubs.com/nanrosvil/283121>
- Wagner, S., & Lindemann, E. (2008). *A case study-based analysis of spare parts management in the engineering industry*. Alemania: Production Planning & Control: The Management of Operations.
- Wan, G., & Cao, Y. (2018). *A continuous cost evaluation approach for periodic review inventory systems with threshold rationing policy*. China: Computers & Industrial Engineering.
- Wauters, M., & Vanhoucke, M. (2015). *A comparative study of Artificial Intelligence methods for project duration forecasting*. Bélgica: Expert Systems With Applications.
- Wild, T. (2017). *Best Practice in Inventory Management* . Routledge.
- Williams, T. (1984). Stock Control with Sporadic and Slow-Moving Demand. *The Journal of the Operational Research Society*, 939-948.
- Xodo, D., & Mavolo, L. (2015). Análisis comparativo de localizaciones Brown-Gibson, ELECTRE y AHP. *Universidad Tecnológica Nacional*.
- Zowid, F., Babai, M., & Douissa, M. (2019). Multi-criteria inventory ABC classification using Gaussian Mixture Model. *International Federation of Automatic Control*.